Ana Catarina Martinho Nunes

Mestre em Ciências Militares Navais – Especialidade de Marinha

Sistema híbrido fotovoltaico / eólico / *diesel* aplicado a um navio, do ponto de vista energético, ambiental e económico

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Energia e Bioenergia

Orientador: Professora Doutora Isabel Maria das Mercês Ferreira, Professora auxiliar, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Benilde Simões Mendes
Arguente: Doutor Carlos Nunes Rodrigues
Vogal: Prof. Doutora Isabel Maria das Mercês Ferreira

Setembro 2014

Ana Catarina Martinho Nunes

Mestre em Ciências Militares Navais – Especialidade de Marinha

Sistema híbrido fotovoltaico / eólico / *diesel* aplicado a um navio, do ponto de vista energético, ambiental e económico

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Energia e Bioenergia

Orientador: Professora Doutora Isabel Maria das Mercês Ferreira, Professora auxiliar, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Benilde Simões Mendes
Arguente: Doutor Carlos Nunes Rodrigues
Vogal: Prof. Doutora Isabel Maria das Mercês Ferreira

Setembro 2014

FICHA TÉCNICA

Título: Sistema híbrido fotovoltaico /eólico/*diesel* aplicado a um navio, do ponto de vista energético, ambiental e económico

Autora: Ana Catarina Martinho Nunes

acmn@campus.fct.unl.pt

acatarina.mnunes@gmail.com

Objectivo do presente trabalho: Dissertação apresentada à Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, para obtenção do grau de mestre em Energia e Bioenergia

Orientação científica do trabalho:
Professora Doutora Isabel Ferreira (FCT-UNL, DCM)

LISBOA, 2014

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas as pessoas, entidades e instituições, que forneceram o seu contributo através de disponibilidade, meios, informações, apoio e motivação, tendo em vista a realização deste trabalho.

Começo por agradecer à Professora Doutora Isabel Ferreira, orientadora científica desta dissertação, pela sua constante disponibilidade, pelos conhecimentos que me transmitiu e pelo contributo da sua opinião. Agradeço também o incentivo transmitido sobre a viabilidade do projecto, o auxílio na eliminação de obstáculos e a revisão fundamentada deste documento.

Agradeço à Professora Doutora Benilde Mendes, Presidente do Departamento de Ciências e Tecnologia da Biomassa e Coordenadora do Mestrado em Energia e Bioenergia da FCT/UNL, por todo o apoio e disponibilidade prestados durante o mestrado, e por possibilitar a realização deste trabalho.

Agradeço:

Ao Professor Doutor Nuno Lapa da FCT/UNL, pelo apoio prestado e esclarecimento de dúvidas variadas, e pelo contributo significativo na obtenção de bibliografia;

Ao Engenheiro João Gomes da Transtejo, pela disponibilidade que sempre apresentou, por me ter apresentado o “LISBONENSE”, possibilitando o registo fotográfico, e por toda a informação que facultou;

Ao Instituto Português do Mar e da Atmosfera e ao Instituto Hidrográfico, pelo envio de dados meteorológicos rigorosos sobre o vento no local de estudo;

Ao Engenheiro Jorge Antunes da TecnoVeritas, pela transmissão de conhecimentos e de informação sobre soluções tecnológicas de eficiência energética nos navios;

Ao Comandante Hugo Bastos da Douro Azul, pela informação que disponibilizou sobre a energia fotovoltaica utilizada nos navios da respetiva empresa;

Aos amigos que sempre acreditaram;

Por fim, quero expressar um agradecimento especial à minha família, que foi a maior motivadora para a realização deste trabalho, especialmente à minha irmã, Joana Nunes, pela eterna disponibilidade e auxílio no Photoshop; à minha mãe, Mª de Lurdes Nunes, pela demonstração do sentido de perseverança e incentivo constante; e ao meu pai, Nuno Nunes, por toda a informação e apoio transmitidos, principalmente a formação em eletrotecnia.

O aumento das concentrações de Gases do Efeito Estufa e do aquecimento global exigem medidas urgentes para abrandar e atenuar as respectivas consequências, tanto para a humanidade como para o planeta. Entre estas medidas, faz parte a utilização de recursos renováveis para a produção de energia, de forma a mitigar os problemas inerentes à utilização de combustíveis fósseis. No intuito de explorar os recursos renováveis, é necessário desenvolver projectos e tecnologias que o optimizem a sua utilização.

A presente dissertação centrou-se na implementação de um sistema energético híbrido FV/eólico/*diesel* num navio. O navio seleccionado, propriedade da Transtejo, foi o "LISBONENSE" e efetua o transporte de passageiros e viaturas entre as margens do Rio Tejo.

A pesquisa de literatura, realizada a níveis nacional e global, incidiu na caracterização das emissões poluentes dos navios e respectivas consequências, e nas soluções que existem para reduzir as mesmas, com principal incidência nos sistemas de energias renováveis.

Após uma pesquisa de mercado para análise da relação custo-benefício de cada tipo de componente do sistema híbrido, foram seleccionados os mais adequados para este projecto, do qual resultou: módulos FV e respectivos cabos eléctricos, turbinas eólicas, baterias de armazenamento, controladores de carga, inversores e um sistema de controlo e monitorização. O gerador a *diesel* considerado é o que se encontra actualmente instalado no navio. Elaborou-se um programa para o sistema de controlo, de forma a accionar o funcionamento do gerador a *diesel* quando necessário, isto é, quando os sistemas de energias renováveis não produzem energia eléctrica suficiente para alimentar as aplicações do navio.

Completado o dimensionamento do sistema híbrido, com auxílio dos *softwares HOMER* e *RETScreen*, foi feita uma análise a nível ambiental e económico que evidenciou diversos aspectos positivos. Destaca-se a redução das emissões de CO_2 em 81.56 % e a rentabilidade do projecto que, com um ciclo de vida de 20 anos, tem um período de recuperação do capital investido de cerca de 6 anos.

Palavras-chave: sistema de energia híbrido, emissões poluentes, navios.

O texto da presente dissertação de mestrado não está escrito ao abrigo do novo Acordo Ortográfico.

ABSTRACT

The increase of concentrations of greenhouse gases and global warming requires urgent action to slow down and attenuate its consequences, both for humanity and for the planet. Among these measures is the use of renewable resources for energy production in order to mitigate the problems inherent in the use of fossil fuels. With the aim of explore renewable resources, it's necessary to develop projects and technologies that optimize their use.

This dissertation focused on the implementation of a hybrid power system PV/wind/diesel on a ship. The selected ship, owned by Transtejo, was the "LISBONENSE" and performs the transport of passengers and vehicles between the Tagus River banks.

The literature research, conducted at national and global levels, covered the characterization of pollutant emissions from ships and their consequences, and the existent solutions to reduce them, with a main focus on the renewable power systems.

After a market research to analyze the cost-benefit of each hybrid system component type, the most suitable were selected for this project, which resulted in: PV modules and their electrical cables, wind turbines, storage batteries, load controllers, inverters and a control and monitoring system. The considered diesel generator is the one that's currently installed on the ship. It was developed a program for the control system in order to start the diesel generator operation when necessary, i.e., when the renewable energy systems don't produce enough electric energy to supply the ship applications.

Completed the sizing of the hybrid system, with the support of HOMER and RETScreen software, an analysis was made at an environmental and economic level that highlighted several positive aspects. It is noteworthy the reduction of CO_2 emissions by 81.56 % and the profitability of the project which, with a life cycle of 20 years, has a invested capital recovery period of approximately 6 years.

Keywords: hybrid power system, pollutant emissions, ships.

The text of this dissertation is not written under the new Orthographic Agreement.

ÍNDICE DE FIGURAS

LISTA DE ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

AC	*Alternating Current*
AIS	*Automatic Identification System*
CFR	*Code of Federal Regulations*
DC	*Direct Current*
ECPINS	*Electronic Chart Precise Integrated Navigation System*
EEDI	*Energy Efficiency Design Index*
EEOI	*Energy Efficiency Operational Indicator*
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
FV	Fotovoltaico/a/os/as
GEE	Gases do Efeito Estufa
GPS	*Global Positioning System*
HOMER	*Hybrid Optimization Model for Electric Renewable*
HSP	Horas de sol pico
HVAC	*Heating, ventilation, and air conditioning*
IMO	*International Maritime Organization*
MEPC	*Marine Environment Protection Committee*
MCR	*Maximum continuous rating* (máxima potência continua em condições normais)
NOCT	*Nominal Operating Cell Temperature*
PCI	*Poder Calorífico Inferior*
POM	*Particulate organic matter*
PV	*Photovoltaic*
RADAR	*Radio Detection And Ranging*
SEEMP	*Ship Energy Efficiency Management Plan*
VAL	Valor Actualizado Líquido
VHF	*Very High Frequency*
VOC	*Volatile Organic Compound*

Símbolo da grandeza	Descrição	Unidades
η	Eficiência	% (Percentagem)
A	Área	m^2 (metro quadrado)
c	Comprimento (medida de distância)	m (metro)
		µm (micrómetro) = 1 x 10^{-6} m
E	Energia	Wh (Watt-hora)
F	Frequência	Hz (Hertz)
Impp	Corrente na potência máxima	A (Ampere)
Isc	Corrente de curto-circuito	A (Ampere)
Ir	Máxima corrente inversa	A (Ampere)
M	Massa molar	g/mol (grama/mole)
m	Massa	g (grama)
		t (tonelada) = 1 x 10^6 g
		Tg (Teragrama) = 1 x 10^{12} g
mCO_2	Massa de CO_2	t (tonelada)
P	Potência	W (Watt)
Pn	Potência nominal	W (Watt)
Pmax	Potência máxima	W (Watt)
R	Resistividade	Ω (Ohm)
T	Temperatura	ºC (Grau Celsius)
V	Volume	L (Litro)
Vmpp	Tensão na potência máxima	V (Volt)
Voc	Tensão do circuito aberto	V (Volt)
Vsys	Tensão máxima do sistema	V (Volt)

Símbolo	Descrição
C	Carbono
CO	Monóxido de Carbono
CO_2	Dióxido de Carbono
Cos φ	*Power Factor:* razão entre a potência real e a potência aparente, em AC.
NOx	Óxidos de Azoto
NO_2	Dióxido de Azoto
O_2	Oxigénio
$PM_{2.5}$	Partículas de matéria com 2.5 µm de diâmetro
SO_2	Dióxido de Enxofre

1.1 Introdução e objectivos

Apesar de opiniões diversas sobre a origem do aquecimento global e da acidificação dos oceanos, já se admite que o aumento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) e o consequente aumento da temperatura global (fig.1.1) estão a alterar a complexa rede de sistemas que permitem o desenvolvimento de vida na Terra: a cobertura de nuvens, as chuvas, os padrões dos ventos, o nível médio das águas do mar, as correntes oceânicas e a distribuição de espécies de plantas e animais, estão a ser afectados (IMO News Magazine, Issue 3/2009).
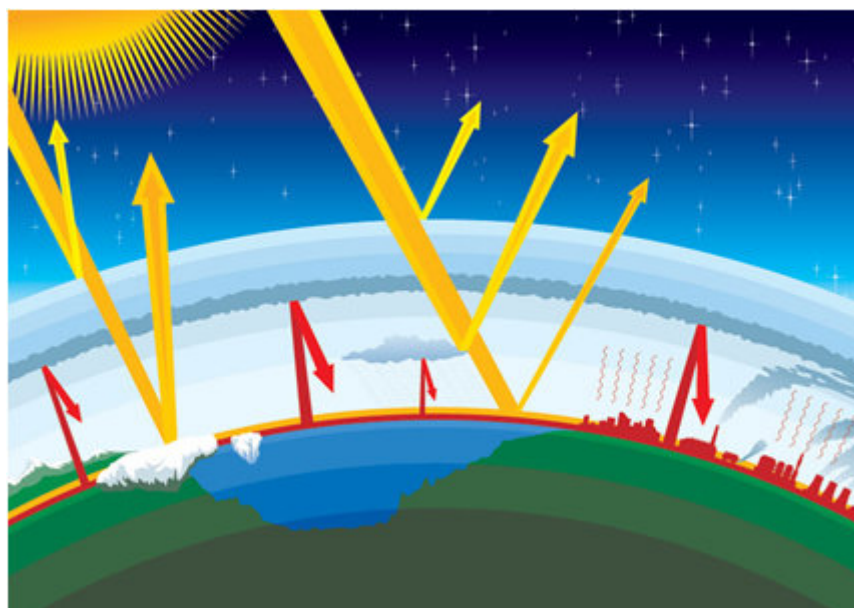
Figura 1.1 – Gases do efeito estufa a provocarem aquecimento global (Fogaça, 2012).

O modo de vida da humanidade irá tornar-se insustentável e há que antecipar e alterar essa situação. É necessário tomar decisões de forma célere, adoptando um compromisso global, válido hoje e no futuro. Para tal, tem que se definir prioridades e fazer sacrifícios (IMO News Magazine, Issue 3/2009).

Há cerca de 70 mil navios empregues no tráfego internacional, sendo que esta indústria transporta mercadorias que correspondem a cerca de 90 % do comércio mundial (MEPC. 1/Circ. 683).

As emissões de partículas e gases de exaustão provenientes dos navios contribuem significativamente para as alterações da composição química da atmosfera, da qualidade do ar a nível local e regional, e do clima. Devido à relativa proximidade da costa, a maioria das emissões dos navios afecta a qualidade do ar nas áreas costeiras (Moldanová *et al.*, 2009; Eyring *et al.*, 2010).

Devido ao aumento das preocupações ambientais que se tem constatado, nomeadamente, referentes às emissões poluentes dos navios, e ao aumento dos custos dos combustíveis, tem surgido uma necessidade de reduzir o consumo de combustível pelos navios (Lindstad *et al.*, 2013).

O presente trabalho consiste no estudo da implementação de um sistema de energia híbrido num navio, que inclui fontes de energia fotovoltaica (FV), eólica e a *diesel*. A investigação foi direccionada para vertentes de eficiência energética, económica e ambiental, analisando as alterações no consumo de combustível provocadas pela implementação do sistema e, consequentemente, nas emissões poluentes e na poupança de custos. O navio seleccionado para o estudo é o "LISBONENSE" que, sendo propriedade da TRANSTEJO, efectua transporte de passageiros e veículos no Rio Tejo.

Perante o problema apresentado, os objectivos desta investigação são:

- A identificação das emissões atmosféricas provenientes de um navio com motor a *diesel*;
- A identificação da dimensão do problema a nível global;
- A identificação dos danos e prejuízos causados pelas emissões poluentes;
- A identificação de soluções tecnológicas e operacionais, que possibilitem aos navios um menor consumo de combustível;
- A identificação e caracterização de sistemas de energia híbridos, passíveis de serem implementados em navios;
- A caracterização do navio "LISBONENSE";
- A identificação da área de navegação onde opera o "LISBONENSE", caracterizando as variáveis meteorológicas e oceanográficas que influenciam o sistema de energia híbrido;
- A elaboração de um modelo teórico-prático de um sistema de energia híbrido FV/eólico/*diesel*, dimensionado e optimizado, aplicável ao navio;
- Utilização de *softwares* como ferramenta auxiliar do dimensionamento;
- Análise ambiental e económica do projecto do sistema de energia híbrido proposto.

1.2 Partes constituintes da investigação

Enquadramento teórico

A presente dissertação começa por apresentar o problema representado pelas emissões atmosféricas poluentes, provenientes dos navios; a par de legislação que tem vindo a ser promulgada no intuito de mitigar esta complexa questão.

No presente trabalho são discriminadas soluções tecnológicas utilizadas para melhorar a eficiência energética de navios, tanto em Portugal, como a nível internacional. Após uma breve introdução às energias renováveis, o destaque principal incide sobre os sistemas de energia híbridos e, em particular, os que incluem fontes de energia FV e/ou eólica, em combinação com gerador a *diesel* e baterias.

Metodologia

O trabalho teórico-prático realizado é um complemento ao enquadramento teórico que se apresenta, e, com o apoio dos *softwares HOMER* e *RETScreen*, permite dimensionar e optimizar um

sistema de energia híbrido FV/eólico/*diesel*, que demonstre ser adequado para o navio "LISBONENSE".

Este trabalho teórico-prático inclui, de forma sucinta:

a) Caracterização energética do navio "LISBONENSE";
b) Selecção dos componentes constituintes do sistema de energia híbrido;
c) Elaboração do modelo do sistema de energia híbrido;
d) Dimensionamentos do sistema e subsistemas;
e) Optimização do sistema de energia híbrido.

Resultados

Dos resultados analisados, obtém-se um sistema de energia híbrido FV/eólico/*diesel* com determinados componentes e optimizado, caracterizado do ponto de vista energético, económico e ambiental, após estudo da sua implementação no navio.

Recomendações

O trabalho conclui-se com a proposta de implementação de um determinado sistema de energia híbrido FV/eólico/*diesel* no navio "LISBONENSE", a fim de diminuir a sua dependência e consumo de combustível fóssil e, consequentemente, as emissões poluentes; com a melhor relação custo-benefício obtida.

1.3 Justificação do tema da dissertação

A opção por este tema surgiu perante a constatação dos efeitos prejudiciais das emissões poluentes provenientes do consumo de combustível pelos navios (figura 1.2).

Figura 1.2 – Emissões poluentes de um navio (Bluebird Marine Systems Ltd, 2014).

A legislação referente a esta fonte de poluição é recente e abrangente, existindo margem para implementar melhorias em diversas vertentes.

O tema também foi impulsionado pela observação do aumento de recursos de energia renováveis disponíveis no mundo e, mais especificamente, em Portugal; a par de uma necessidade de independência no consumo de combustíveis fósseis, tendo em vista benefícios ambientais e económicos.

Com este trabalho pretende-se dar um contributo para a solução do problema, nomeadamente, no navio "LISBONENSE"; o qual poderá contribuir para um menor custo do combustível consumido para o proprietário e, por conseguinte, para redução de emissões de CO_2.

Actualmente, apesar de existirem preocupações ambientais a bordo dos navios, salienta-se a escassez de medidas adoptadas, a nível nacional, para melhorar a eficiência energética e o consumo de combustível.

2.1 Legislação e directivas

Como os gases de escape dos navios contribuem para a poluição mundial do ar e do mar, os navios estão a enfrentar um número crescente de normas e regulamentos, bem como apelos voluntários dos legisladores internacionais, nacionais e locais (Eyring *et al.*, 2010).

A IMO está actualmente a trabalhar em regulamentos de GEE para a navegação global, dos quais se espera um impacto substancial nas emissões poluentes provenientes dos navios (Lee *et al.*, 2013). A tabela 2.1 sumariza as convenções internacionais relevantes.

Tabela 2.1 – Convenções Internacionais sobre poluição do meio marinho

Título	Observações
Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento de 03 a 14 de Junho de 1992 (Rio de Janeiro)	Elaboração da "Agenda XXI", cujo capítulo 17 é denominado por "Protecção dos oceanos, de todos os tipos de mares – inclusive mares fechados e semifechados – e das zonas costeiras, e protecção, uso racional e desenvolvimento dos seus recursos vivos". Caracterização de novas abordagens de gestão e desenvolvimento marinho e costeiro. Cooperação em actividade empreendidas. Medidas adicionais e observação do meio marinho.
Decisão do Conselho 2002/358/CE de 25 de Abril (Protocolo de Quioto)	Estabelece objectivos vinculativos e quantificados de limitação e redução dos GEE para os estados-membros.
Dec. 59/97, de 31 de Outubro (Convenção para a Protecção do Meio Marinho do Atlântico Nordeste - OSPAR)	"As Partes contratantes tomam todas as medidas possíveis para prevenir e combater a poluição, bem como as medidas necessárias à protecção da zona marítima contra os efeitos prejudiciais das actividades humanas de forma a salvaguardar a saúde do homem e a preservar os ecossistemas marinhos."
Dec. 25/87, de 10 de Julho (Convenção para a prevenção da poluição por navios - Convenção MARPOL 73/78)	Anexo VI: Abrange a poluição atmosférica por navios causada pela emissão de substâncias que destroem o ozono. Estabelece limites para as emissões de SOx e NOx nos gases de escape dos navios e proíbe a emissão deliberada de substâncias que destroem o ozono.
Dec. 67-A/97, de 14 de Outubro (Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar - Montego Bay)	Obrigação de proteger e preservar o meio marinho. Medidas para prevenir, reduzir e controlar a poluição do meio marinho.
Decreto do Governo nº 79/83, de 14 de Outubro de 1983, D. R. 237 I Série (Convenção Internacional para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar - SOLAS 74)	Especifica os padrões mínimos para a construção, equipamento e operação de navios, compatível com a sua segurança.

A MEPC. 1/Circ. 683 inclui orientações para o desenvolvimento de um Plano de gestão de eficiência energética de navios (SEEMP) , reconhecendo a necessidade de desenvolver ferramentas para apoiar as companhias de transporte marítimo na gestão do desempenho ambiental dos seus

navios. Os Governos membros são convidados a incentivar as administrações, indústrias, organizações de transporte marítimo relevantes, companhias de navegação e outros intervenientes interessados, a utilizarem estas orientações de forma voluntária.

Cumprindo com a Convenção MARPOL e outros instrumentos da IMO, e com as acções que muitas empresas já adoptam para além dos requisitos obrigatórios, pode-se limitar o impacto sobre o meio ambiente global, causado pelo transporte marítimo durante as suas operações. A melhoria das eficiências pode reduzir o consumo de combustível, economizar dinheiro e diminuir os danos ambientais de cada navio. Enquanto o resultado das medidas individuais pode parecer pequeno, o efeito colectivo em toda a frota pode ser significativo (MEPC. 1/Circ. 683).

As directivas presentes na MEPC.1/Circ.684 podem ser usadas voluntariamente como base de um Indicador Operacional de Eficiência Energética (EEOI), que irá auxiliar os armadores, operadores de navios e partes interessadas, na avaliação do desempenho da frota no que diz respeito às emissões de CO_2. Como a quantidade de CO_2 emitida por um navio está directamente relacionada com o consumo de combustível de *diesel* pelo mesmo, o EEOI também pode fornecer informações úteis sobre o desempenho de um navio em relação à eficiência do combustível.

Trata-se de um indicador para a eficiência energética de um navio, em operação, como expressão da eficiência, sob a forma de CO_2 emitido por unidade de trabalho de transporte marítimo, isto é: EEOI = mCO_2 ÷ trabalho de transporte.

Este índice é aplicável a todos os navios que executam trabalhos de transporte, nomeadamente, cargueiros, petroleiros, navios de gás, porta-contentores e navios de passageiros.

O EEOI de cada viagem é calculado pela seguinte fórmula:

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \times CF_j}{m_{carga} \times D}$$

A média do indicador para um determinado período ou número de viagens é calculada pela seguinte fórmula:

$$EEOI = \frac{\sum_i \sum_j (FC_{ji} \times CF_j)}{\sum_i (m_{carga,i} \times D_i)}$$

Os termos que compõem o indicador são:

- j – Tipo de combustível.
- i – Número de viagens (período entre a partida de um porto e a partida do próximo porto).
- FC – combustível consumido no mar e no porto ou numa viagem ou período em questão, por exemplo, um dia, pelos motores principais e auxiliares, incluindo as caldeiras e incineradores;
- FC_{ij} – Massa do combustível j consumido na viagem i.
- CF – Factor de conversão não-dimensional entre o consumo de combustível medido em t e a emissão de CO_2 medida em t com base no teor de carbono; o valor do CFj para o *diesel* é 3.206 t CO_2 / t combustível.

- m_{carga} – Carga transportada (t) ou trabalho produzido (número de passageiros ou automóveis) ou tonelagem bruta; a massa da carga transportada ou o trabalho é expresso da seguinte forma:
    - Para navios de passageiros – o número de passageiros ou tonelagem bruta do navio;
    - Para ferries de automóveis – número de automóveis ou metros de pista ocupados;
    - No caso do navio em estudo, que transporta passageiros e automóveis, aplicam-se ambos os tipos de carga.
- D – Distância em milhas náuticas correspondente ao trabalho produzido; distância real navegada em milhas náuticas numa viagem ou período em questão.

(MEPC.1/Circ.684)

A monitorização de um EEOI deve ser realizada por pessoal em terra, utilizando dados obtidos a partir de registos existentes, tais como os diários de bordo e os livros de registo de engenharia e de consumos de combustível (MEPC. 212 (63)).

O Comité de Protecção do ambiente marinho, em 2009, reconheceu a necessidade de desenvolver um Índice de Eficiência Energética de Projecto (EEDI) para navios novos, de forma a estimular a inovação e o desenvolvimento técnico de todos os elementos que influenciam a eficiência energética de um navio desde a sua fase de projecto. Salientando a aplicabilidade da fórmula do EEDI para todas as categorias de navios e da viabilidade dos parâmetros técnicos, a fórmula ainda precisa ser aperfeiçoada para melhorar o método de cálculo do EEDI. Deste modo, foi emitida a circular com directrizes sobre o método de cálculo do EEDI para novos navios e os Governos membros, dos quais faz parte o de Portugal, e as organizações observadoras, foram convidadas a utilizar estas directrizes, para fins de teste e ensaios numa base voluntária, em navios com sistemas de propulsão convencionais (motor principal com propulsão mecânica) e, na medida do possível, em navios com sistemas não convencionais (MEPC.1/Circ.681).

O EEDI obtido para novos navios é uma medida da eficiência com base no CO_2 e é calculado pela seguinte fórmula:

EEDI =

Main engine(s) | Auxiliary engine(s) | Energy saving technologies (auxiliary power) | Energy saving technologies (main power)

$$\frac{\left(\prod_{j=1}^{M} f_j\right)\left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}\right) + \left(P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}\right) + \left(\left(\prod_{j=1}^{M} f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)}\right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE}\right) - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}\right)}{f_i \cdot f_c \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}}$$

Transport work

Figura 2.1 – Fórmula de cálculo do EEDI (IMO, 2012)

Os termos que compõem o cálculo do índice são:

- CF – Factor de conversão não-dimensional entre o consumo de combustível medido em t e a emissão de CO_2 medida em t com base no teor de carbono. Os índices Mei e Aei referem-se aos motores principais e auxiliares, respectivamente. O CF corresponde ao combustível utilizado quando é determinado o SFC.
- Vref – Velocidade do navio, medida em nós (milhas náuticas por hora), em águas profundas, na condição de capacidade máxima, com determinada potência nos veios dos motores, e assumindo que não há efeito do vento e da ondulação.
- Capacidade – Tonelagem de arqueação bruta.
- Peso bruto – Diferença em toneladas entre o deslocamento de um navio em águas com densidade relativa de 1.025 kg/m^3 e com o calado máximo operacional, e o deslocamento leve.
- P – Potência dos motores principais e auxiliares, medida em kW. Os índices *ME* e *AE* referem-se aos motores principais e auxiliares, respectivamente. O somatório em *i* é para todo os motores incluídos em *nME* (número de motores).
- $P_{ME(i)}$ – 75 % do MCR de cada motor após dedução de qualquer veio instalado:
  $P_{ME(i)} = 0.75\times (MCR_{Mei} - P_{PTOi})$
- $P_{PTO(i)}$ – 75 % do output de cada gerador de veio instalado dividido pela eficiência relevante desse gerador.
- $P_{PTI(i)}$ – 75 % do consumo de potência nominal de cada motor do veio dividido pela média ponderada da eficiência dos geradores.
- $P_{eff(i)}$ – 75 % da redução da potência do motor principal devido à tecnologia inovadora de eficiência energética mecânica.
- $P_{Aeeff(i)}$ – Redução da potência auxiliar devido à tecnologia inovadora de eficiência energética eléctrica, medida em $P_{ME(i).}$
- P_{AE} – Potência do motor auxiliar requerida para fornecer a carga máxima no mar incluindo a energia necessária para os sistemas/máquinas de propulsão como, por exemplo, bombas do motor principal, sistemas e equipamentos de navegação, mas excluindo a potência que não é utilizada nos sistemas/máquinas de propulsão como, por exemplo, hélices, bombas e equipamentos de carga, bombas de lastro, etc., na condição em que o navio se encontre em trânsito à velocidade Vref, e capacidade de carga de projecto. No caso de navios de passageiros, o valor de P_{AE} deve ser estimado através da energia eléctrica consumida (excluindo a propulsão) em condições em que o navio se encontra em trânsito à velocidade Vref, dividida pela média ponderada da eficiência dos geradores. Os valores dos consumos de energia eléctrica encontram-se tabelados em registos de cada navio.
- Os parâmetros Vref, Capacidade e P, devem ser coerentes entre eles.
- SFC – Consumo de um específico combustível certificado dos motores, medido em g/kWh.
- Fj – Factor de correcção a ter em conta devido a elementos específicos do projecto do navio.
- Fw – Coeficiente não-dimensional que indica a redução de velocidade em condições de mar representadas por altura e período da ondulação e por velocidade do vento.

- Feff(i) – Factor de disponibilidade de cada tecnologia de eficiência energética inovadora.
- Fi - Factor de capacidade de qualquer limitação técnica ou regulamentar na capacidade, e pode ser 1 se for dispensada a necessidade do factor. Excepto os navios que trabalham no gelo, o Fi deve ser 1.
(MEPC.1/Circ.681)
- Fc – Factor de correcção da capacidade cúbica e deve ser 1 se não é garantida a necessidade do factor.
(MEPC.212 (63))

De acordo com a Convenção Internacional MARPOL, Anexo VI, Capítulo 4, Regulamento 21, o EEDI requerido é calculado através da seguinte fórmula: $a \cdot b^{-c}$, em que “a” e “c” são valores tabelados e “b” é a capacidade (tonelagem de arqueação bruta).

2.2 Emissões atmosféricas de navios

A emissão de gases de escape dos motores a *diesel* marítimos é uma das principais questões ambientais da actualidade (Park *et al.*, 2001). Estas emissões e as de partículas, provenientes de navios, representam um contributo significativo para a carga antropogénica e crescente no total das emissões do sector dos transportes, o que afecta a composição química da atmosfera, do clima e da qualidade do ar local e regional, e da saúde (Eyring *et al.*, 2010).

As emissões da navegação nas águas europeias contribuem de 10 a 20 % para o total de emissões da navegação mundial (European Environment Agency, 2013).

A regulamentação sobre as emissões de navios exige conhecimento abrangente do consumo de combustível e emissões actuais, compreensão do seu impacto na composição atmosférica e no clima, e projecções de evoluções futuras, assim como opções de mitigação.

As estimativas globais indicam que o transporte marítimo emite entre 0.9 e 1.7 milhões de toneladas de partículas por ano. Cerca de 70 % das emissões dos navios ocorrem até 400 km da linha de costa, causando problemas de qualidade do ar através da formação de ozono ao nível do solo, de emissões de enxofre e de partículas em zonas costeiras e portos com muito tráfego (Moldanová *et al.*, 2009; Winnes & Fridell, 2010). Adicionalmente, as emissões poluentes dos navios podem ser transportadas na atmosfera ao longo de várias centenas de quilómetros e, assim, contribuir para problemas de qualidade do ar no interior, mesmo sendo emitidas no mar. Os esforços actuais para reduzir o enxofre e outros poluentes do transporte marítimo podem modificar esta situação (Fridell *et al.*, 2008).

A análise elementar e de microestrutura dos resíduos da combustão de navios indicam três estruturas morfológicas distintas com diferentes composições químicas:

a) Agregados de fuligem, contaminados significativamente por metais;
b) Partículas de carvão, puro ou com minerais;
c) Partículas minerais e/ou de cinzas (Moldanová *et al.*, 2009).

Foram também observadas partículas de carbono orgânico provenientes do combustível não queimado e/ou do óleo lubrificante (Fridell *et al.*, 2008); assim como constituintes perigosos

provenientes da queima de combustível de petróleo, como metais de transição e alcalino-terrosos (V, Ni, Ca, Fe) (Moldanová *et al.*, 2009).

2.2.1 Tipos de poluentes

Sendo a navegação mundial um dos maiores contribuintes para as emissões de GEE, é responsável por 3 % do total de emissões de CO_2 (Lee *et al.*, 2013).

Considera-se que 80 a 90 % do comércio mundial é transportado via marítima, emitindo 560 a 1360 x 10^6 t CO_2/ano. Em 2000, os navios emitiram cerca de 780 Tg CO_2/ano, que corresponde a um consumo de combustível de 250 x 10^6 t e a uma contribuição de 2.7 % de todas as emissões antropogénicas de CO_2 nesse ano (Eyring *et al.*, 2010). Em 2007, segundo a IMO, o transporte marítimo emitiu 1046 x 10^6 t CO_2, o que representou 3.3 % do total de emissões de CO_2 no mundo (Lindstad *et al.*, 2011).

A figura 2.2 apresenta os principais GEE que influenciam o aumento do aquecimento global.

Um dos focos ambientais é a libertação de gases como o CO_2, NOx e SOx de navios para a atmosfera, originando um aumento no rigor da regulamentação sobre os gases de escape (Park *et al.*, 2001).
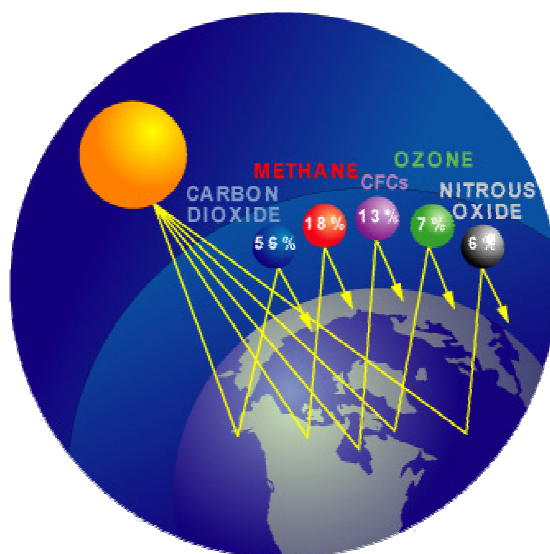
Figura 2.2 – GEE e consequente aumento da temperatura global (Chiozzotto, 2011).

Os principais compostos emitidos são o dióxido de carbono (CO_2), óxidos de azoto (NOx), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis (VOC), dióxido de enxofre (SO_2), carbono negro (BC) e matéria orgânica particulada (MOP) (Eyring *et al.*, 2010; European Environment Agency, 2013).

As emissões de NOx e outros precursores de ozono originam a formação de ozono troposférico (O_3) e perturbam as concentrações de hidróxidos (OH) e, consequentemente, a existência do metano (CH_4). O componente do aerossol dominante, que resulta das emissões dos navios, é o sulfato (SO_4^{-2}), que é formado pela oxidação de SO_2.

Estima-se que, no ano 2000, as emissões libertadas incluíram 5.4 x 10^6 t de NOx, 5.5 x 10^6 t de SOx e 1.4 x 10^6 t de partículas (Eyring *et al.*, 2010).

A figura 2.3 apresenta a contribuição das emissões de NO_2 e $PM_{2.5}$ proveniente dos navios, relativamente ao total, em 2005.
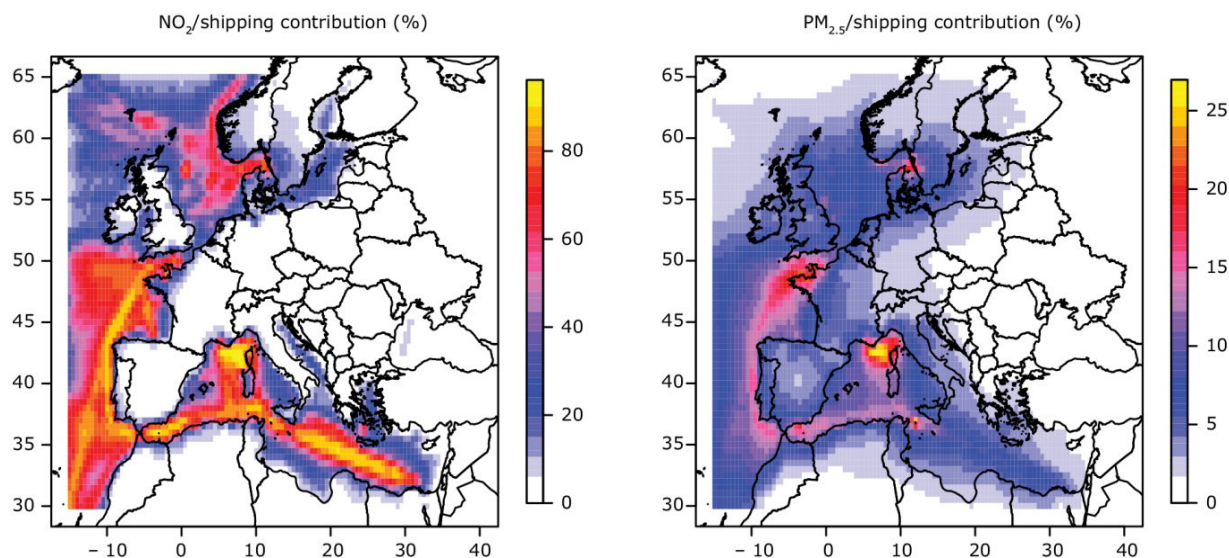
Figura 2.3 – Contribuição relativa das emissões da navegação internacional em 2005, de NO_2 e $PM_{2.5}$ (European Environment Agency, 2013).

O aumento das partículas de sulfato durante o arrefecimento dos gases de escape está em concordância com as concentrações de SO_3 detectadas nos gases de escape quentes, indicando que o sulfato é formado por oxidação de SO_2, seguido de formação e condensação de H_2SO_4 (Moldanová *et al.*, 2009).

2.2.2 Danos provocados pelos poluentes

Numa escala local, os efeitos dos poluentes presentes nas emissões podem ser significativos, principalmente em águas costeiras pouco profundas, onde o transporte marítimo é mais concentrado (Eyring *et al.*, 2010). A sensibilidade das cidades portuárias à poluição atmosférica depende, entre outros factores, da densidade do tráfego de navios (Winnes & Fridell, 2010).

Os impactos regionais das emissões dos navios incluem aumentos na concentração de NOx, CO_2, VOCs, e SO_2 e consequentes perturbações do ozono e outros produtos fotoquímicos, aumento da concentração de partículas e uma maior deposição de compostos de enxofre e de azoto acidificantes e eutrofizantes. O aumento de NOx e SO_2 provenientes dos navios contribui para a acidificação dos oceanos (Eyring *et al.*, 2010).

Determinados estudos epidemiológicos relacionam as concentrações de partículas com os impactos negativos para a saúde, incluindo asma, ataques cardíacos, internamentos nos hospitais e mortalidade prematura. Indicam que as emissões de partículas relacionadas com o transporte marítimo são responsáveis por cerca de 60 000 mortes de origem cardiopulmonar e de cancro do

pulmão, por ano, em que a maioria das mortes ocorre perto da costa da Europa, da Ásia Oriental e do Sul da Ásia (Corbett *et al.*, 2007; Eyring *et al.*, 2010). A figura 2.4 apresenta um mapa da Europa com os valores de mortalidade cardiopulmonar anual, associada às emissões de partículas poluentes pelos navios. As partículas emitidas pelos navios com superfícies cobertas de metais de transição e compostos orgânicos também têm potencial para causar efeitos negativos na saúde (Moldanová *et al.*, 2009).
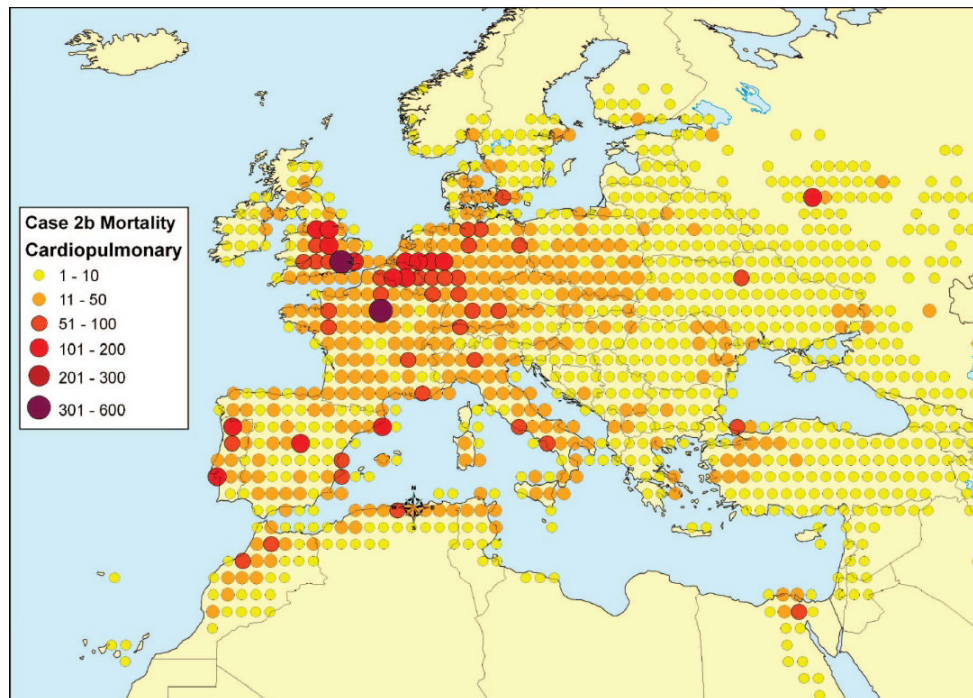
Figura 2.4 – Mortalidade cardiopulmonar anual na Europa atribuída às emissões de partículas pelos navios (Corbett et al., 2007).

Adicionalmente, as emissões dos navios provocam impactos nos ecossistemas (European Environment Agency, 2013).

2.2.3 Soluções para reduzir emissões poluentes

Em termos globais, a eficiência operacional obtida por um grande número de operadores de navios será uma grande contribuição para a redução das emissões de carbono.

Um Plano de Gestão da Eficiência Energética do Navio (SEEMP) fornece uma possível abordagem para a monitorização da eficiência de navios e frotas ao longo do tempo e algumas opções e mecanismos de optimização do desempenho do navio (TecnoVeritas, 2012b; MEPC. 1/Circ. 683). O SEEMP está vinculado a uma política mais ampla de gestão de energia da empresa que o detém, opera ou controla, pois os navios operam sob diferentes condições. Assim, as orientações para o desenvolvimento de um SEEMP devem ser ajustadas às características e necessidades de cada empresa e de cada navio, sendo uma ferramenta de auxílio na gestão do desempenho

ambiental dos navios e, como tal, a empresa deve desenvolver procedimentos para a implementação do plano de forma a minimizar os encargos a bordo. Este SEEMP inclui quatro etapas: planeamento, implementação, monitorização, auto-avaliação e melhoria.

O planeamento, sendo a fase mais crucial, determina o estado actual da utilização de energia no navio e a melhoria esperada na eficiência energética do mesmo.

Existem várias opções para melhorar a eficiência e o melhor conjunto de medidas para um navio difere muito, dependendo do tipo de navio, cargas, rotas e outros factores. As medidas específicas devem ser primeiramente identificadas, pois nem todas as medidas podem ser aplicadas a todos os navios, ou até para o mesmo navio, sob diferentes condições de funcionamento.

A melhoria da eficiência energética não depende necessariamente apenas da gestão do navio, mas sim de muitos intervenientes, incluindo os estaleiros de reparação naval, armadores, operadores, fretadores, proprietários da carga, serviços de administração de portos e de tráfego. Para uma implementação efectiva e constante das medidas adoptadas, é necessário aumentar a sensibilização para o assunto e fornecer treino ao pessoal, tanto em terra com a bordo.

O planeamento termina com o estabelecimento de metas a atingir, numa base voluntária, tendo como objectivo incentivar para uma implementação adequada, e aumentar o compromisso com a melhoria de eficiência energética. Uma das metas pode ser o consumo de combustível anual ou um alvo específico para o EEOI.

Após identificação das medidas, há que estabelecer um sistema para a sua implementação (MEPC. 1/Circ. 683).

A eficiência energética deve ser monitorizada quantitativamente, e o EEOI desenvolvido pela IMO é uma das ferramentas estabelecidas internacionalmente para obter um indicador quantitativo da eficiência energética de um navio e/ou frota em funcionamento. Assim, o EEOI pode ser considerado como o principal instrumento de monitorização, embora outras medidas quantitativas também possam ser apropriadas. Ao utilizar-se o EEOI, este deve ser calculado de acordo com as directrizes desenvolvidas pela IMO, constantes na MEPC.1 / Circ.684.

Se for conveniente ou benéfico para o navio ou companhia, podem ser utilizadas outras ferramentas, determinando o conceito e o método na fase de planeamento.

A procura pela eficiência adopta responsabilidades em toda a cadeia de transporte, em que todos devem incluir medidas de eficiência nas operações individuais e colectivas. Entre as diversas operações destacam-se:

a. Melhorar o planeamento da viagem;
b. Efectuar o roteamento de acordo com as condições meteorológicas e oceanográficas;
c. Efectuar contacto antecipado com o próximo porto de atracação;
d. Optimização de velocidade;
e. Optimização da potência do veio;
f. Optimização do manuseamento do navio (caimento, lastro, hélice, leme, sistemas de controlo da posição, autopiloto, etc.);
g. Manutenção do casco;
h. Manutenção do sistema de propulsão;

i. Reaproveitamento do calor residual;
j. Melhorar a gestão das frotas;
k. Melhorar o manuseio de cargas;
l. Gestão de energia;
m. Utilizar combustível alternativo;
n. Utilizar fontes de energia renováveis (eólica, solar, FV).

Apesar de existirem várias possibilidades de melhoria da eficiência energética para os navios, estão muitas vezes dependentes da área de operação e do comércio. Cada oceano e mar do mundo tem condições características e os navios destinados a determinados comércios e rotas podem não obter os mesmos benefícios, adoptando as mesmas medidas que outros navios adoptaram. Algumas medidas têm maior ou menor efeito em diferentes áreas de navegação.

Estas medidas são potencialmente rentáveis perante os elevados preços do petróleo, e se anteriormente eram consideradas comercialmente desinteressantes, actualmente são viáveis, atendendo a vida útil de cada navio e os custos do combustível (MEPC. 1/Circ. 683).

O MEPC da IMO estabeleceu regulamentos mais rigorosos para o teor de enxofre no combustível e de emissões de NOx, com o objectivo de reduzir o teor de enxofre no combustível, a nível mundial, para menos de 0.5 % a partir de 2020. Sendo a média actual de cerca de 2.7 %, a aplicação dos regulamentos irá efectivamente reduzir as emissões de partículas de sulfato (Moldanová *et al.*, 2009).

2.2.4 Casos práticos de soluções em Portugal

Constata-se que já existe uma grande preocupação ambiental em Portugal, em constante evolução, que inclui questões de mitigação das emissões poluentes no meio marinho. Para tal, foram desenvolvidas soluções tecnológicas aplicáveis aos navios, tanto para os que operam em águas de jurisdição portuguesa, como para vender a partes interessadas de outro país.

Exemplos de soluções que visam melhorar a redução destas emissões poluentes, assim como optimizar o respectivo sistema energético, são alguns dos produtos da empresa TecnoVeritas como, por exemplo:

a) *TecnoCat* - Catalisador de NOx – Utilizado no tratamento da emissão dos gases de escape de motores estacionários a *diesel*, eliminando até 90 % de NOx presente nos gases (TecnoVeritas, 2011).
b) *Engine Diagnosis System* – Através da medição da pressão dos cilindros e de outras variáveis em motores a *diesel*, protege e monitoriza o sistema, optimizando a combustão e as emissões dos gases de escape (TecnoVeritas, 2011).
c) *Enermulsion* – Através da mistura de pequenas quantidades de água no combustível e da homogeneização da emulsão, melhora a eficiência da combustão, poupa no consumo específico de combustível, e reduz as emissões de NOx (TecnoVeritas, 2012a).

d) *Voyage Energy & Emissions Optimiser* – Através do controlo e monitorização efectiva das emissões do navio, permite optimizar a energia a bordo. Entre vários indicadores, este sistema permite monitorizar o EEOI definido na MEPC.1/Circ.684 da IMO (TecnoVeritas, 2013).

A Douro Azul é uma empresa que possui diversos cruzeiros fluviais e, recentemente, adquiriu dois novos navios à construtora nacional Navalria – o "QUEEN ISABEL" e o "AMAVIDA".

Destacando-se a nível mundial devido a inovações tecnológicas e de eficiência energética únicas no sector dos cruzeiros fluviais, cada um destes navios possui um convés solar com módulos FV, ocupando uma área de 155 m^2, que fornecem energia eléctrica às 80 televisões de bordo (Douro Azul, 2013).

2.3 Integração de energias renováveis

Recentemente, os sistemas energéticos que integram fontes de energia renováveis têm recebido uma atenção considerável a nível mundial. Estes sistemas podem incluir diferentes componentes, tais como sistemas de distribuição de corrente contínua (DC) ou alternada (AC), sistemas de armazenamento, conversores e sistemas de controlo para a gestão das necessidades energéticas, que podem ser interligados em diferentes arquitecturas (Mezzai *et al.*, 2014).

É necessário aumentar a pesquisa e desenvolvimento das tecnologias das energias renováveis, para continuar a melhorar o seu desempenho e as técnicas para prever a sua produção, podendo integrá-las em sistemas com fontes convencionais, como o *diesel* ou a rede eléctrica. As fontes de energia renováveis têm mostrado excelente potencial como uma forma de contribuição suplementar para estes sistemas. Desenvolvimentos futuros podem aumentar a atracção financeira destes sistemas e melhorar a sua aceitação pelo utilizador.

Uma das aplicações mais promissoras da tecnologia de energia renovável é a instalação de sistemas de energia híbridos em áreas remotas, onde a extensão da rede é cara, e o custo do combustível aumenta muito com o isolamento do local.

A fim de satisfazer as necessidades sustentáveis de carga durante condições naturais variáveis, os recursos de energia renováveis precisam ser integrados uns com os outros, utilizando conversores. Estas fontes de energia, como a FV ou eólica, podem constituir uma boa alternativa para produção de energia eléctrica em áreas isoladas (Nema *et al.*, 2009)

Os geradores a *diesel* são geralmente a fonte principal (e muitas vezes única) de energia eléctrica dos navios. A indústria de transporte marítimo é consideravelmente afectada pelo aumento do preço dos combustíveis, que têm estado em constante flutuação nos últimos anos. O uso de fontes de energia renováveis poderá dar um contributo muito significativo na redução da dependência do preço de *diesel* altamente imprevisível, mas especialmente na redução das emissões de CO_2.

Em todo o mundo, os governos têm-se esforçado por aumentar a comparticipação da energia renovável na produção de energia, focando-se na segurança energética, no aumento dos preços das fontes de energia à base de carbono e em minimizar o aquecimento global (Lee *et al.*, 2013).

2.3.1 Tipos de recursos renováveis

As principais fontes alternativas aos combustíveis fósseis, disponíveis, incluem o vento, o sol, o calor da terra, as marés, as ondas e a biomassa, entre outros. Os sistemas de conversão destas fontes em energia eléctrica podem ser pequenos, grandes, isolados, ligados à rede, ou sistemas híbridos (Rehman *et al.*, 2012).

A energia eólica e a solar são omnipresentes, disponíveis gratuitamente e "amigas" do ambiente (Nema *et al.*, 2009).

A produção de electricidade a partir de recursos renováveis, como o sol ou o vento não emite GEE. No entanto, é consumida determinada quantidade de energia durante a produção e o transporte dos componentes do sistema FV e eólico, assim como durante a fase de desactivação dos mesmos. As emissões consequentes destes processos dependem das tecnologias utilizadas, da distância percorrida entre a fábrica e o local do sistema de energia, e do tipo de transporte utilizado (Dufo-López *et al.*, 2011).

2.3.2 Disponibilidade dos recursos renováveis

A contribuição da energia eólica e solar em sistemas energéticos depende da intensidade e da duração da disponibilidade das respectivas fontes de energia, e as condições climáticas determinam esta disponibilidade e respectiva quantidade. Por exemplo, num estudo focado em Bugia, uma cidade da Argélia, a contribuição do vento com uma velocidade de 4.5 m/s foi 13 %, enquanto a uma velocidade de 5.0 m/s foi 18 %. Este estudo comprovou que, por cada aumento de 0.5 m/s na velocidade do vento, a contribuição da energia eólica aumentava 5 % no sistema. Por outro lado, a contribuição da energia solar aumenta 1 % por cada aumento de 0.5 $kWh/m^2/d$ na intensidade da fonte solar.

O dimensionamento de um sistema eólico depende principalmente da localização, pois esta determina a velocidade média do vento e, consequentemente, a energia disponível para o consumo das aplicações (Mezzai *et al.*, 2014). Assim, os sistemas de energia eólica podem não ser tecnicamente viáveis em todos os locais devido a eventuais baixas velocidades do vento e ao facto de ser mais imprevisível que a energia solar. (Nema *et al.*, 2009)

Devido à rugosidade de diversos tipos de terrenos, os locais povoados são potenciais originadores de turbulência no vento, enquanto o meio marítimo apresenta uma rugosidade muito reduzida. Assim, os ventos no mar são mais constantes, o que lhe atribui maior potencial para aproveitamento de energia eólica (Ferreira, 2011).

Existem estudos prévios de viabilidade que são baseados em dados meteorológicos (velocidade do vento e insolação solar) e em requisitos de carga para um local específico. De forma a calcular o desempenho de um sistema existente, ou prever o consumo de energia ou a energia produzida a partir de um sistema na fase de concepção, são necessários dados meteorológicos adequados.

Um sistema híbrido eólico/solar pode ser projectado com a ajuda de padrões climáticos globais, para qualquer localização do mundo; em que a decisão sobre a melhor solução viável baseia-se na localização.

A combinação de módulos FV e de turbinas eólicas num sistema híbrido de energia reduz as necessidades do banco de baterias e do *diesel* mas a viabilidade deste sistema depende fortemente da radiação solar e do potencial do vento disponíveis no local. Deste modo, são utilizados dados de estações meteorológicas para os estudos de pré-viabilidade de projectos deste tipo de sistemas (Nema *et al.*, 2009).

A energia FV produzida não é regular, apresentando picos de altos e baixos devido à flutuação da radiação solar provocada pelas nuvens. A média da energia eléctrica flutuante do painel FV pode ser obtida através da carga ou descarga da bateria, quando a capacidade de armazenamento da mesma é suficiente. É desejável que o tamanho da bateria seja tão mínimo quanto possível do ponto de vista dos custos, do espaço que ocupa e do peso (Park *et al.*, 2001); com uma capacidade para armazenar o máximo de energia renovável produzida.

2.4 Sistema de energia híbrido

Um sistema híbrido gera energia combinando duas ou mais fontes de energia diferentes. Os sistemas híbridos exibem maior flexibilidade e melhor aproveitamento dos recursos e, consequentemente, a possibilidade de minimizar custos de produção relativamente aos sistemas que utilizam apenas uma fonte de energia. Se os sistemas híbridos forem optimizados adequadamente, tornam-se mais rentáveis e confiáveis (Rehman *et al.*, 2012; Nema *et al.*, 2009; Dufo-López *et al.*, 2011).

Para além das fontes de energia, este tipo de sistemas inclui um equipamento para condicionar energia, um controlador e um sistema opcional para armazenamento de energia, conferindo qualidade à mesma (Nema *et al.*, 2009).

Os sistemas híbridos têm-se tornado populares em aplicações em áreas remotas, incluindo em infra-estruturas básicas, devido aos avanços nas tecnologias das energias renováveis e ao aumento substancial no preço dos produtos petrolíferos (Nema *et al.*, 2009; Maleki & Askarzadeh, 2014). A revisão de literatura revela que os sistemas híbridos de energias renováveis têm baixas emissões poluentes, mas ainda não têm um custo competitivo em relação aos sistemas de energia de combustível fóssil. Contudo, a necessidade de energia renovável e as melhorias nas tecnologias de energias alternativas poderão generalizar o uso destes sistemas.

Um estudo efectuado sobre Geoje, uma ilha da Coreia do Sul, propõe a utilização de um navio híbrido que, anualmente, pode reduzir 3.5 t de GEE, equivalente a CO_2. Adicionalmente, durante um tempo de vida de 20 anos, pode ser evitado um total de 70 t de GEE. Com a utilização dos painéis FV, existe uma elevada redução em CO_2 e poupança de combustível, em comparação com o sistema apenas a *diesel* (Lee *et al.*, 2013). A percentagem de energias renováveis utilizadas no sistema híbrido é 35 % e consegue evitar 4 976.8 t de GEE, nomeadamente CO_2, anualmente, na atmosfera local. Adicionalmente, durante o período de vida útil do projecto, pode ser evitada a emissão de 99 536 t de GEE. Relativamente ao sistema energético apenas a *diesel*, constatou-se que

ocorre uma diminuição de 29 % das emissões poluentes. Cada MWh de electricidade produzida a partir de fontes renováveis resulta numa poupança de 1.7 barris de petróleo (Rehman *et al.*, 2012).

2.4.1 Tipos de sistemas de energia híbridos

O uso de energia FV em navios foi estudado em Osaka, no Japão, onde investigadores propuseram um sistema híbrido FV/*diesel* para um pequeno navio. O objectivo de aplicar este tipo de sistema é minimizar o consumo de combustível e, através de armazenamento da energia em baterias, o motor a *diesel* mantém o output constante com elevada eficácia, apesar da flutuação da potência FV.

Comprovaram que um grande sistema FV e uma pequena bateria tende a ter inferior taxa de utilização dos recursos FV. Se a dimensão do painel for adequada, e a bateria possuir uma elevada capacidade de armazenamento, a radiação solar é aproveitada ao máximo. Por outro lado, um sistema com um pequeno subsistema FV tende a ser pior no consumo de combustível. Concluíram que os sistemas com painéis FV de maior potência e baterias com maior capacidade de armazenamento podem mesmo prescindir do consumo de combustível (Park *et al.*, 2001).

No sistema híbrido projectado para o navio em Osaka, uma das desvantagens do sistema FV é a flutuação imprevisível da energia eléctrica produzida, causada pela radiação solar instável. Este factor pode fazer com que o output do motor a *diesel* flutue, diminuindo a sua eficácia e aumentando os gases de escape.

A disposição dos componentes principais – painel FV (*PV Array*), gerador a *diesel* (*Diesel Generator*), bateria *(Battery)* e inversor *(Inverter)* – do sistema de energia considerado é apresentada na figura 2.5. Com esta disposição, supõem-se determinadas condições:

- A potência do output do gerador a *diesel* de saída pode ser controlada;
- A bateria pode ser carregada e descarregada em qualquer altura, se necessário;
- O armazenamento de energia da bateria pode ser conhecido (Park *et al.*, 2001).
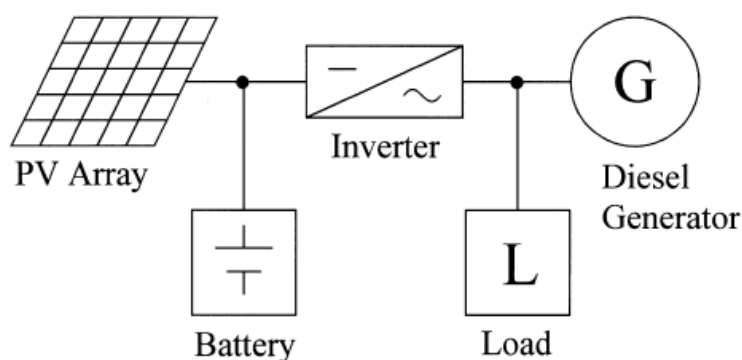
Figura 2.5 – Sistema de energia híbrido FV/*diesel* (Park et al., 2001).

No estudo em que o navio é utilizado no transporte entre a ilha de Geoje e o continente, o protótipo do navio “verde” consiste num sistema de energia FV, um motor a *diesel*, baterias de armazenamento de energia, um sistema de controlo híbrido, um inversor autónomo; e é ligado à rede. Os objectivos deste protótipo são minimizar o consumo de combustível, operando em modo individual e, num futuro próximo, apoiar a rede eléctrica, ligado à rede do continente e da ilha.

A potência do sistema híbrido é 3.2 kW para assegurar as aplicações eléctricas do navio, tais como iluminação, GPS, sistemas de comunicação e vídeo. Como tal, foram instalados painéis FV com 3.2 kW (em condições NOCT) na parte traseira de um navio convencional de passageiros. Neste, estão instalados dois geradores a *diesel* (20 kW) para satisfazer as ocasionais cargas de pico do motor do guincho que puxa a âncora do navio. Contudo, a potência das aplicações eléctricas de base do navio é inferior a 3 kW, que pode ser completamente assegurada pelo sistema FV (em condições NOCT). Foi também instalado um banco de baterias no porão do navio, considerando a estabilidade do mesmo, sendo que esta é uma das maiores preocupações para um navio deste tipo.

A produção de energia dos painéis FV foi estimada alterando o ângulo de inclinação. Os resultados mostraram que os painéis com 0º de inclinação apresentaram pouca produção de energia devido à sujidade neles acumulada. Assim, a inclinação foi alterada para 15º. Atendendo à segurança dos passageiros, foi instalado debaixo do painel uma chapa de policarbonato resistente ao impacto.

Para avaliar a estabilidade do navio híbrido, foi verificado e avaliado o peso de cada componente, prevenindo a exposição do navio e da guarnição a perigos imprevisíveis que possam ocorrer no mar. A modificação do navio convencional foi concretizada sem alterar o seu tamanho, no entanto, os centros de gravidade vertical e horizontal foram afectados ligeiramente pela remoção e instalação de componentes, tais como painéis FV, conversores de energia e chapas de policarbonato.

Quando provocadas variações aleatórias nas aplicações eléctricas, e quando a energia produzida pelos painéis FV é superior às cargas eléctricas, o banco de baterias é carregado pela quantidade em excesso, para poder ser utilizada posteriormente. Pelo contrário, as baterias suportam a escassez quando a energia produzida pelos painéis é inferior às necessidades eléctricas.

Durante o teste de alteração do modo FV para o modo *diesel* e vice-versa, constatou-se que demorou entre 8 a 10 segundos para o gerador alcançar o funcionamento normal. No entanto, a energia proveniente das baterias suportou a estabilidade de transição, incluindo necessidades energéticas críticas, tais como o GPS e o RADAR.

Dos resultados da estratégia de operação, da avaliação de estabilidade e da análise económica, obtiveram as seguintes conclusões:

- A instalação do painel FV tem que ter em consideração o custo de investimento, a manutenção e resistência ao vento;
- A alteração do modo independente para o modo ligado à rede (e vice-versa) pode ser controlada automaticamente ou manualmente pelo comandante do navio;
- O navio híbrido irá diminuir a dependência em combustíveis fósseis;
- Este tipo de navio tem um elevado potencial para ser utilizado em países com ilhas, especialmente actualizando navios existentes com sistemas apenas a *diesel* (Lee *et al.*, 2013).

Vários sistemas de energia híbridos foram instalados em muitos países ao longo da última década, competindo com fontes convencionais de energia de combustível em áreas remotas.

Estão disponíveis vários programas de simulação, o que permite o dimensionamento óptimo deste tipo de sistemas. O recente estado da arte do seu desenvolvimento tecnológico resulta de pesquisas em diversas áreas, tais como:

- Avanços na conversão de energia eléctrica, através de novos dispositivos semicondutores electrónicos de energia, têm aumentado a eficiência, qualidade e fiabilidade dos sistemas;
- Desenvolvimento de *softwares* de simulação versátil;
- Avanços no processo de fabrico e melhoria da eficiência dos módulos FV;
- Desenvolvimento de controladores automáticos e personalizados que melhoram o funcionamento dos sistemas e reduzem os requisitos de manutenção;
- Desenvolvimento de baterias aperfeiçoadas;
- Disponibilidade de componentes mais eficientes e confiáveis, que possam recuperar o seu custo ao longo do respectivo ciclo de vida;
- Melhoria do controlador do sistema, permitindo controlar a interacção dos vários componentes do sistema e controlar o fluxo de energia, tornando-a estável e fiável.

É necessário continuar a investigar o potencial e o desempenho dos sistemas de energia FV e eólica para calcular o nível de penetração em redes existentes de países desenvolvidos ou em desenvolvimento, de forma a melhorar a qualidade do fornecimento de energia (Nema *et al.*, 2009)

2.4.2 Sistema de energia híbrido FV/eólico/*diesel*

Uma vez que a energia produzida por módulos FV e por turbinas eólicas é dependente da variação dos respectivos recursos – sol e vento – e as necessidades de carga eléctrica oscilam, o principal objectivo deste sistema híbrido é satisfazer a carga em qualquer momento e armazenar o excesso de energia para utilização posterior em condições de défice (Maleki & Askarzadeh, 2014).

O estudo de Ekren *et al.* projectou e desenvolveu um procedimento de dimensionamento óptimo de um sistema híbrido eólico/FV/*diesel*, para pequenas aplicações na Turquia. A optimização dos componentes foi feita através de métodos estatísticos e matemáticos.

A investigação de Saheb-Koussa *et al.* projectou um sistema híbrido eólico/FV/*diesel* com baterias para aplicações remotas na Argélia. Os resultados das simulações, obtidos através do *software MATLAB*, indicaram que este sistema tem um desempenho e fiabilidade superior ao sistema apenas FV ou eólico.

Um estudo aplicável a uma ilha na Arábia Saudita, projectou um sistema de energia híbrido eólico/FV/*diesel*, de forma a reduzir o consumo de *diesel* e manter um fornecimento de energia constante numa vila; substituindo a actual central eléctrica a *diesel* com oito geradores. Foi utilizado um *software* para optimizar o sistema híbrido – o *HOMER* – uma ferramenta de modelação e optimização de sistemas energéticos híbridos. Este *software* contém uma série de modelos de componentes energéticos e avalia opções tecnológicas apropriadas com base no custo e disponibilidade dos recursos. A análise com o *HOMER* requer informações sobre os recursos,

restrições económicas, métodos de controlo, *inputs* sobre os tipos de componentes, incluindo a sua quantidade, os custos, a eficiência, a longevidade, etc. Pode ainda ser feita análise de sensibilidade com variáveis, tendo uma gama de valores em vez de um número específico (Rehman *et al*., 2012; Nema *et al*., 2009).

O *HOMER* sugeriu um sistema híbrido optimizado, constituído por três turbinas eólicas de 600 kW cada uma (26 % de energia eólica), painéis FV com 1000 kW (9 % de energia solar), quatro geradores com 1120 kW de potência cada um, e um conversor. O sistema proposto fornece energia à vila com 35 % de energia renovável, com ventos médios de 5.85 m/s e radiação solar de 5.75 kWh/m^2/dia; e com 65 % de energia proveniente dos geradores a *diesel*. O excesso de energia produzido correspondente apenas a 4.1 % (Rehman *et al*., 2012).

No *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), o *HOMER* também é utilizado como ferramenta para dimensionamento e optimização de sistemas.

Mezzai *et al*., apresenta um estudo referente a Bejaia, uma região costeira da Argélia com grande potencial solar, sobre identificação e modelação de um sistema energético híbrido FV/eólico/células de combustível, com baterias. A estratégia de controlo foi experimentalmente implementada e compararam os resultados práticos com os resultados da simulação sob as mesmas condições meteorológicas, mostrando a eficácia do sistema híbrido proposto. Neste projecto, o sistema de armazenamento é composto por oito baterias interligadas em série e paralelo para obter a tensão necessária. Estas são utilizadas quando o sistema FV ou eólico não podem ser funcionais, armazenando a energia e garantindo a autonomia, a tensão e a corrente necessárias para as aplicações eléctricas. A estratégia de controlo consegue supervisionar e manter constante a tensão da bateria.

O sistema proposto é simples devido ao reduzido número de componentes, mas pode ser concebido e instalado para potências maiores, sendo considerado como um protótipo para o desenvolvimento de novos sistemas híbridos (Mezzai *et al*., 2014).

Após o estudo de pré-viabilidade de um sistema híbrido, a selecção e o dimensionamento adequado dos equipamentos condiciona a sua fiabilidade e economia. Para tal, existem várias técnicas de programação para minimizar o custo médio de produção da electricidade e atender às necessidades eléctricas de um modo fiável, tendo em consideração os factores ambientais.

A dimensão ideal de um sistema híbrido de energia FV/eólica pode ser calculada com base horária, tendo em conta a potência média diária, a potência mínima solar por mês ou a potência mínima de vento por mês, entre outro parâmetros.

A combinação ideal do sistema pode ser seleccionada com base nos custos de capital e nível de autonomia anual. Tem-se observado que, para alcançar autonomia elevada, é necessário um gerador de reserva que, consequentemente, reduz a necessidade de armazenamento da bateria.

Quanto ao fluxo de energia, deve ser feita a sua gestão em todo o sistema proposto, entre os componentes, de modo a assegurar o fornecimento contínuo da carga necessária, com a sua exigência total. A estratégia de operação do fluxo de energia pode ser delineada antes do dimensionamento.

O sistema de controlo dos sistemas híbridos deve minimizar o consumo de combustível e, consequentemente, o custo energético, através da maximização de energia proveniente de fontes renováveis. Tendo em consideração as flutuações dos recursos energéticos, é necessário desenvolver a técnica do controlo atempadamente.

Na optimização dos sistemas, a modelação dos componentes deve ser feita, primeiro, individualmente e, em seguida, avalia-se a sua combinação (Nema *et al.*, 2009).

Um estudo modelou e optimizou um sistema híbrido FV/eólico/*diesel* com baterias, autónomo, utilizado para alimentar a rede eléctrica de Rafsanjan, uma área remota do Irão. A figura 2.6 apresenta a sua configuração, consistindo em painéis FV (*PV Panel*), turbinas eólicas (*Wind Turbine*), um gerador a *diesel* (*Diesel Generator*) e baterias (*Battery*). Antes da carga (*Load*) é utilizado um inversor DC/AC, uma vez que a maioria dos aparelhos eléctricos é alimentada com corrente alternada. Caso as necessidades eléctricas sejam demasiado elevadas, ultrapassando a capacidade das baterias, o gerador a *diesel* satisfaz a restante carga. A modelação foi feita através do *software Matlab* (Maleki & Askarzadeh, 2014).
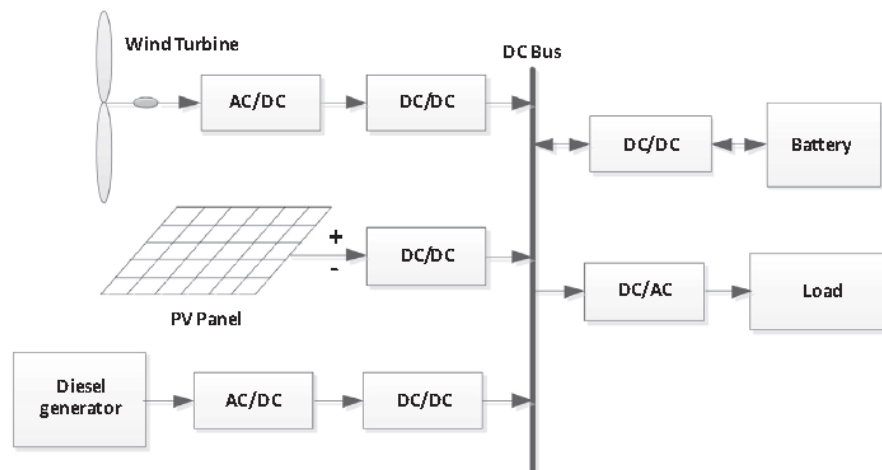
Figura 2.6 – Exemplo de sistema de energia híbrido FV/eólico/*diesel*/baterias no Irão (Maleki & Askarzadeh, 2014).

Na presente dissertação, o sistema híbrido proposto é semelhante a este em termos de componentes.

A figura 2.7 apresenta os gráficos das necessidades energéticas, ao longo de um dia em Rafsanjan, assim como a energia fornecida pelas diferentes fontes de energia, incluindo as baterias e o gerador a *diesel*. Pode-se constatar que as turbinas eólicas são a fonte que produz mais energia e que, por outro lado, com a utilização das baterias, o *diesel* é utilizado pouco ou nada.
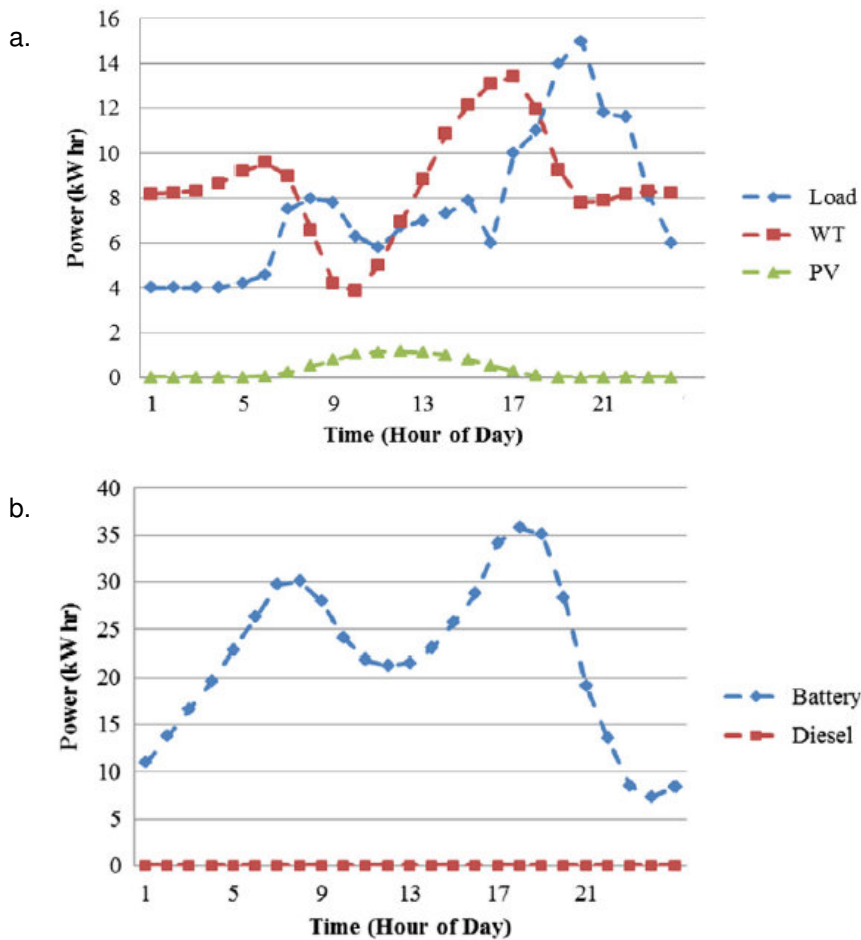
Figura 2.7 – Energia eléctrica necessária (a) e fornecimento de energia das diferentes fontes (a, b) (Maleki & Askarzadeh, 2014).

Outro modelo de sistema híbrido FV/eólico/*diesel*, cuja aplicação é proposta para o aeroporto de Saragoça e para Jaca, em Espanha, é apresentado na figura 2.8. Durante o processo de optimização, o estudo ponderou a inclusão de um gerador a gasolina, mas foi demonstrado que não era rentável em nenhuma das soluções (Dufo-López *et al.*, 2011).
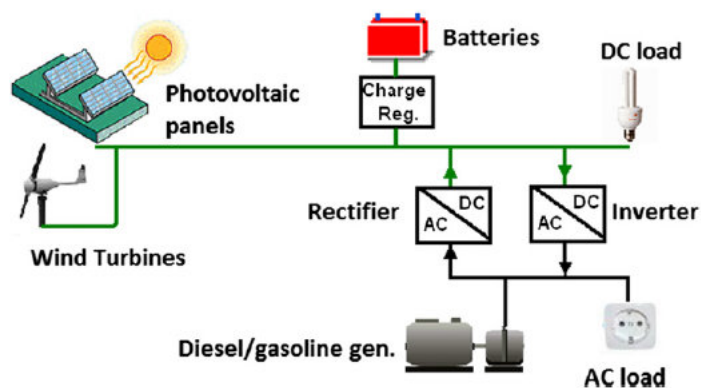
Figura 2.8 – Exemplo de sistema de energia híbrido FV/eólico/*diesel*/baterias em Espanha (Dufo-López et al., 2011).

2.4.3 Análise económica

Como os sistemas de energia FV e eólica ainda são relativamente caros nos custos de instalação, os sistemas híbridos que incluem um gerador a *diesel* conseguem ter um menor custo do que sistemas apenas com fontes renováveis. No entanto, como o custo da energia é calculado com base em todos os custos futuros durante a vida útil do sistema, se o custo futuro do combustível for muito maior do que o esperado, pode haver um aumento significativo no custo da energia (Dufo-López *et al.*, 2011).

Quanto mais optimizado for o projecto de um sistema híbrido, maior é a sua rentabilidade e eficiência económica (Maleki & Askarzadeh, 2014).

No estudo da ilha Geoje, o investimento inicial foi 18 182 €. Para calcular o período de retorno, utilizaram os seguintes princípios e equações:

- O custo do investimento inicial inclui os componentes do sistema híbrido e a construção de renovação do navio convencional;
- O custo de manutenção não está envolvido no cálculo porque é extremamente reduzido em sistemas FV;
- O consumo do gerador a *diesel* é 3 Lts/hora;
- Os preços de combustível e dos painéis FV são constantes (no entanto, recentemente, o custo dos painéis tem decrescido e do combustível tem aumentado, o que faz diminuir o período de retorno);
- A utilização de energia FV resultará em ganho de créditos de aproximadamente 14.85 euros por cada tonelada de GEE;
- O número máximo de dias de operação do sistema híbrido é definido como 150 por ano, e o número máximo de horas é definido como 6 por dia;
- Não há apoios financeiros do governo, tais como incentivos fiscais, o que poderia reduzir o período de retorno.

O período de retorno do investimento no navio híbrido proposto, na ilha Geoje, é 11.87 anos, que pode diminuir devido ao aumento de horas de operação, à diminuição dos preços dos equipamentos (principalmente, os inerentes às energias renováveis), ao aumento do preço do *diesel*, e à implementação dos regulamentos de emissão de CO_2.

Embora o navio híbrido seja de baixo custo, no seguimento do potencial da energia renovável, continua a ser essencial um subsídio do governo para o seu uso generalizado (Lee *et al.*, 2013).

No estudo relativo à vila da Arábia Saudita, o sistema híbrido sugerido tinha um custo de investimento de 10 684 956 €, um custo de operação anual de 1 869 718 €, totalizando um custo líquido actualizado de 32 130 471 € e um custo de energia de 0.16 €/kWh. Após comparação, provaram que o sistema eléctrico apenas a *diesel* não era económico. A produção deste sistema eólico/FV equivale a uma poupança de 10 824 barris de petróleo, isto é, a um ganho de 672 222 €, anualmente. Após 20 anos da sua integração no sistema a *diesel* existente, as receitas podem ser superiores a 13 milhões de euros. O custo da energia do sistema apenas a *diesel* é cerca de 9.4 % mais elevado do que o do sistema híbrido (Rehman *et al.*, 2012).

Os resultados do projecto optimizado para Rafsanjan, no Irão, mostraram que os custos do sistema FV/eólico/*diesel*/bateria são muito inferiores aos custos do sistema alimentado apenas a *diesel*, equivalente a uma poupança de cerca de 75 % (Maleki & Askarzadeh, 2014).

Devido ao impacto directo do preço do *diesel* no custo da energia, actualmente, um sistema híbrido torna-se sempre viável em comparação com o sistema apenas a *diesel* (Rehman *et al*., 2012).

Novas melhorias na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias FV e eólicas irão reduzir o custo das fontes de energia renováveis, e o custo dos recursos energéticos convencionais está a aumentar a cada ano; tornando económicos os sistemas híbridos no futuro. Os aspectos económicos destas tecnologias são suficientemente promissores pata aumentar a produção de energia, incluindo nos países desenvolvidos.

Apesar da redução do custo e do desenvolvimento dos sistemas híbridos, estes continuam a ser uma fonte de energia dispendiosa. De forma a generalizar esta aplicação, é necessário continuar a melhorar as tecnologias FV e eólicas que possam reduzir os custos; principalmente devido ao aumento do custo de recursos convencionais verificado todos os anos (Nema *et al*., 2009).

3.1 Navio de estudo

A tabela 3.1 e a figura 3.1 apresentam as características principais do navio em estudo.

Tabela 3.1 – Características do navio "LISBONENSE"

Parâmetro	Valor
Nome	LISBONENSE
Proprietário	Transtejo
Local de operação	Entre as margens Norte e Sul do Rio Tejo
Comprimento fora a fora	47.5 m
Boca	16 m
Calado máximo	2.2 m
Distância do tecto da ponte à linha de água	10.57 m
Tonelagem bruta	150 t
Peso bruto	190 t
Deslocamento	630 t (máximo); 440 t (leve)
Tanque combustível	82 m^3
Tanque aguada	4 m^3
Potência nominal do motor Caterpillar C32 V12 ACERT	634 kW
Potência máxima do gerador Caterpillar C4.4 DITA	65 kW (P eléctrica) / 75.4 kW (P mecânica)
Tensão do gerador	400 V
Número de passageiros	360 + 3 tripulantes
Viaturas	29
Velocidade serviço	11 nós
Construtor	Navalria
Ano construção	2009
Área do convés do solário	336 m^2
Potência máxima dos equipamentos de consumo de energia eléctrica	39.4 kW
Número viagens por dia	20 (10 no sentido N-S e 10 no sentido S-N)
Média de tempo diário de consumo dos equipamentos	4 horas

Figura 3.1 – “LISBONENSE” a operar no Rio Tejo (Macedo, 2011).

As aplicações eléctricas utilizadas diariamente no “LISBONENSE”, que totalizam a potência máxima de 39.4 kW, estão apresentadas na tabela 3.2. Não foram incluídas aplicações utilizadas em caso de emergência como, por exemplo, o farol de busca.

Tabela 3.2 – Aplicações eléctricas diárias do “LISBONENSE” (Transtejo a); Transtejo b))

Equipamentos eléctricos		
GPS	Faróis de navegação	Bombas de lastro/esgoto
Impulsor de proa	Unidade de tratamento de ar	Compressor de ar
RADAR de rio	Compressor de HVAC	Bombas de combustível
Apito eléctrico	Bomba de circulação do condensador	Depuradoras
AIS	Extractor	Separador de águas oleosas
Repetidor de dados	ETAR e bomba de descarga	Bomba hidráulica
Girobússola	Hidróforo de água salgada	Intercomunicadores
Odómetro	Hidróforo de água doce	Consola de alarmes
Sonda de fundo baixo	Alternador	Termoacumulador
Radiotelefone VHF	Escape	Televisão
Limpa vidros	Bombas de incêndio/baldeação	

Considera-se que todos os equipamentos eléctricos apresentados funcionam a uma tensão de 400 V. O valor de 39.4 kW considerado é a potência máxima do consumo, contudo, os equipamentos não se encontram na totalidade a trabalhar em simultâneo.

Em 2013, o gerador a diesel funcionou durante 1446 horas, de forma a alimentar electricamente os equipamentos durante as navegações, o que equivale a uma média de 4h/dia.

3.2 Área de estudo

O navio em foco neste estudo – "LISBONENSE" – opera na área representada na figura 3.2, que se encontra localizada no Rio Tejo. A área inclui o trajecto efectuado diariamente pelo navio, que é limitado a Norte pelo Terminal Fluvial do Cais do Sodré e a Sul pelo Terminal Fluvial de Cacilhas. Cada trajecto consiste em 1920 jardas (0.96 milhas náuticas), ou seja, 1778 metros.
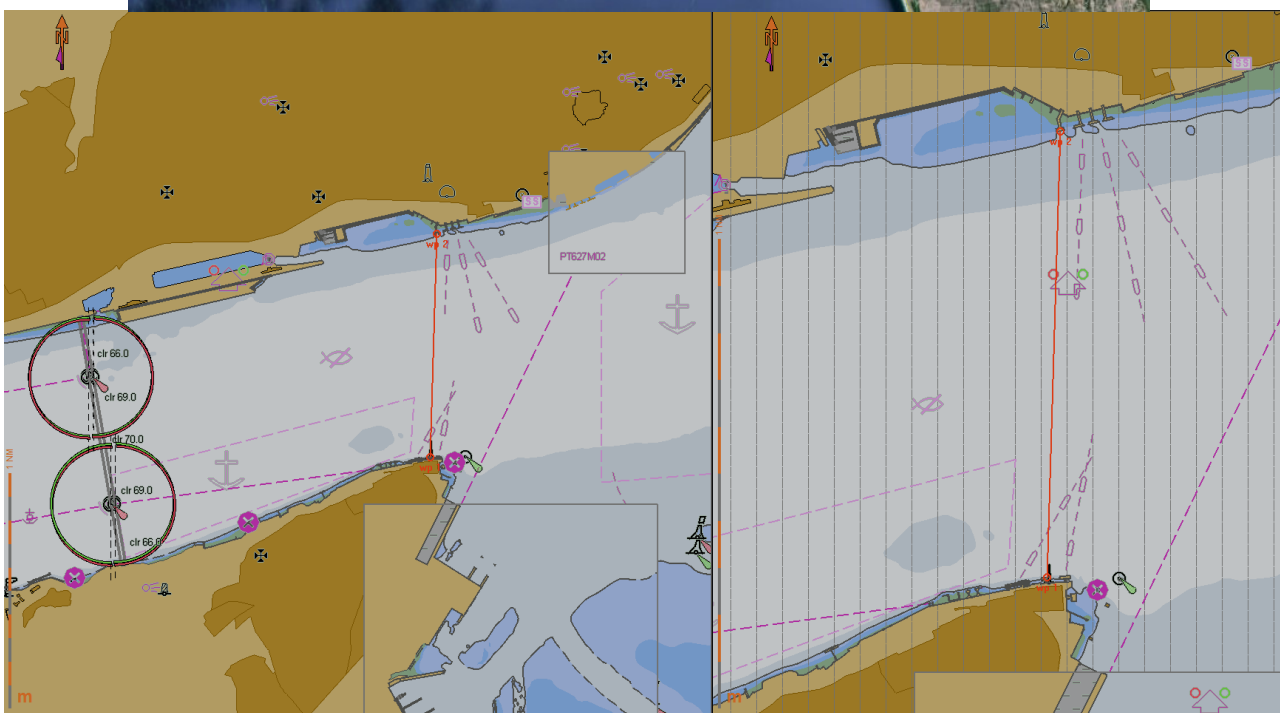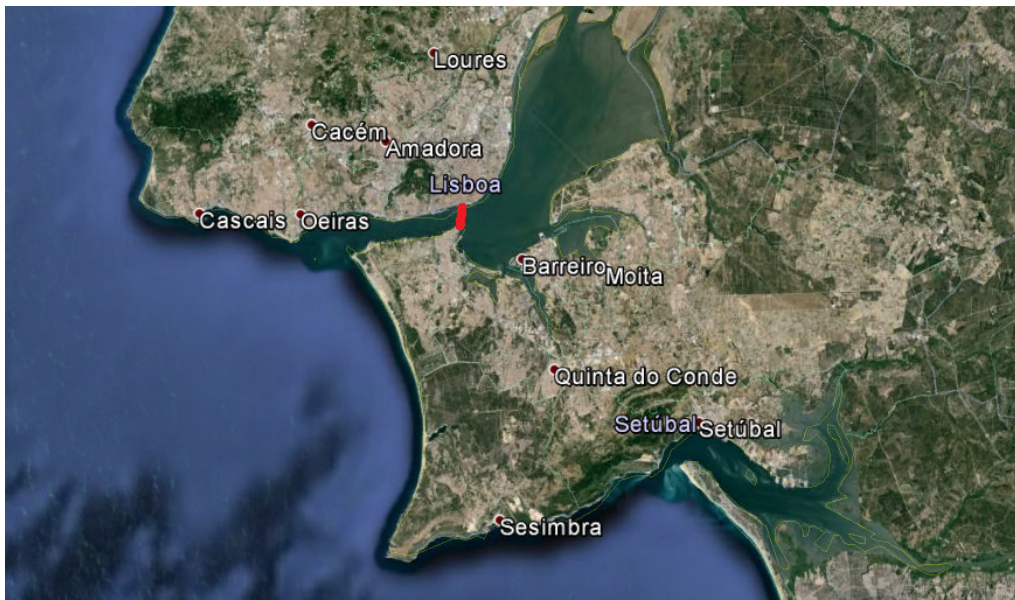
Figura 2.2 – Área do trajecto do "LISBONENSE", utilizada para estudo (*Software* ECPINS).

3.3 *Softwares* de apoio

Com o objectivo de sustentar as decisões adoptadas na optimização do sistema híbrido FV/eólico/*diesel* foram utilizados dois *softwares* como ferramentas auxiliares: o *HOMER* e o *RETScreen*. Ambos permitem inserir os dados das fontes de energia (renováveis e convencionais, como o *diesel*) e dos recursos disponíveis no local de estudo e apresentam análise de emissões de GEE e económica.

3.3.1 *HOMER*

O *HOMER* é um *software* de optimização que simula variadas configurações e escalas de sistemas de fontes de energia renováveis, com base no custo líquido actualizado, que é o custo total da instalação e operação do sistema ao longo do seu ciclo de vida. O cálculo avalia todos os custos que ocorrem durante a vida do sistema, incluindo custos iniciais, substituições de componentes, manutenções e combustível; assim como receitas e o valor residual dos componentes do sistema, no final de vida útil do projecto.

O *HOMER* assume que todos os preços aumentam na mesma proporção, e aplica uma taxa de juros anual real, em vez de uma taxa de juros anual nominal.

São fornecidos os valores de poupança anual, correspondente ao período de duração do projecto (Rehman *et al*., 2012).

Os principais dados a inserir no *HOMER* pelo utilizador são:

a) Velocidade média do vento (m/s);
b) Valor da radiação solar (kWh/m²/dia);
c) Valor das necessidades energéticas (kWh);
d) Especificações técnicas dos componentes;
e) Custo do investimento, da substituição e da manutenção dos componentes;
f) Parâmetros económicos, incluindo custo do combustível;
g) Controlos e limitações do sistema.

(Rehman *et al*., 2012)

A unidade dos valores monetários do *HOMER* é em dólar americano ($), no entanto, os resultados serão convertidos para euro (€).

3.3.2 *RETScreen*

O *RETScreen* é um *software* muito utilizado em estudos de pré-viabilidade ou de viabilidade de sistemas de energia. Trata-se de uma ferramenta relativamente precisa na avaliação da viabilidade de sistemas com fontes renováveis. No entanto, não proporciona um método de optimização, isto é, ao contrário do *HOMER*, não apresenta uma solução ideal com diversos parâmetros. Usufruindo dos recursos do *RETScreen*, pode-se avaliar as tecnologias de energias renováveis e o seu potencial de produção (Lee *et al*., 2012).

Os principais dados a inserir no *RETScreen* pelo utilizador são:

a) Localização (a partir da qual uma base de dados do *software* fornece informação sobre os recursos energéticos disponíveis);
b) Especificações técnicas dos componentes;
c) Valor das necessidades energéticas (kWh);
d) Custo do investimento, valor das despesas e receitas;
e) Parâmetros económicos, incluindo custo do combustível.

3.4 Como efectuar e optimizar o dimensionamento do sistema híbrido

O sistema híbrido FV/eólico/*diesel* proposto é autónomo, sendo concebido para alimentar um conjunto de cargas que operam isoladas da rede eléctrica, durante as navegações. Neste tipo de sistemas, para além das fontes de energia, devem ser incluídos outros equipamentos, tais como baterias, controlador de carga e inversor. As fontes de energia renováveis serão a radiação solar e o vento, utilizadas através de módulos FV e turbinas eólicas.

O princípio de funcionamento do sistema híbrido será o seguinte:

a) Se, durante um determinado intervalo de tempo, a energia produzida pelas fontes renováveis (turbinas eólicas e módulos FV) for superior às necessidades de carga das aplicações eléctricas, o excesso de energia carrega as baterias;
b) Se, durante um determinado intervalo de tempo, a energia produzida pelas fontes renováveis (turbinas eólicas e módulos FV), juntamente com a energia armazenada nas baterias, for inferior às necessidades de carga das aplicações eléctricas, o gerador a *diesel* fornece a energia que falta.

3.4.1 Módulos FV

A escolha dos módulos FV é feita em função das aplicações eléctricas que, neste estudo, são os equipamentos do navio. O número total de módulos é determinado em função do espaço disponível no navio, atendendo à existência de objectos no convés e à necessidade de serem criados corredores de segurança e manutenção dos módulos FV.

O sombreamento que ocorre nos módulos FV prejudica a sua eficiência e segurança. Maioritariamente, as sombras são temporárias, tendo origem, por exemplo, na presença de folhas e sujidade de proveniência diversa (dejectos de pássaros, poeiras de zonas industriais, etc.), ou em nuvens. No entanto, grande parte da remoção da sujidade efectua-se de forma natural, desde que os módulos FV estejam posicionados com um ângulo mínimo de inclinação – na ordem de 12º. Assim, este ângulo mínimo de inclinação permite que os depósitos sejam facilmente removidos através da água da chuva (Carneiro, 2010).

A nível de orientação dos módulos, estes deveriam ser instalados com orientação para Sul (figura 3.3), pelo facto do navio operar no hemisfério Norte.

Quando à inclinação dos módulos, esta deveria ser igual ao valor da latitude no local que, neste caso, equivale a 38º. No Verão deve-se diminuir 10 % na inclinação e no Inverno deve-se aumentar 10 %, no intuito de optimizar a potência dos módulos (Morais, 2009).
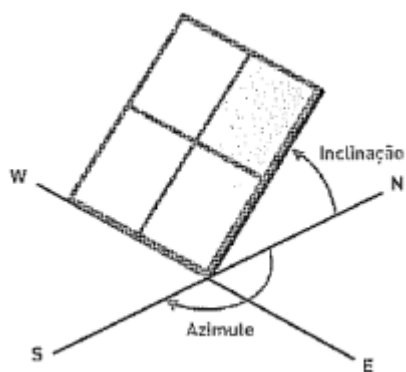
Figura 3.3 – Orientação e inclinação dos módulos FV (Morais, 2009).

Com base na localização pretendida para a instalação dos módulos – área de estudo – e do respectivo número de HPS (tabela 3.3 e figura 3.4), obtém-se o Output médio diário do módulo FV e os requisitos diários das aplicações passíveis de serem alimentadas pelo sistema FV:

a) HSP = Radiação solar (kWh/m^2) / 1000 (W/m^2)
b) Output diário do módulo FV (Wh/dia) = Corrente da carga do módulo (A) (Impp) x Nº horas de sol pico (HSP) x Tensão de funcionamento do sistema (V)
c) Número mínimo de módulos necessários = Requisitos diários das aplicações (Wh/dia) ÷ Output diário do módulo FV (Wh/dia) ÷ Eficiência carga da bateria (%)

Tabela 3.3 – Número de HSP entre Cacilhas e o Cais do Sodré (WeatherOnline Ltd, 2014)

Mês	HSP
Janeiro	2.40
Fevereiro	3.31
Março	4.72
Abril	6.00
Maio	6.82
Junho	7.26
Julho	7.25
Agosto	6.71
Setembro	5.39
Outubro	3.81
Novembro	2.59
Dezembro	2.01

Na área em estudo, na posição de Latitude 38º41'51''N e Longitude 009º08'40''W, os valores médios diários e anuais de radiação solar estão indicados na figura 3.4.
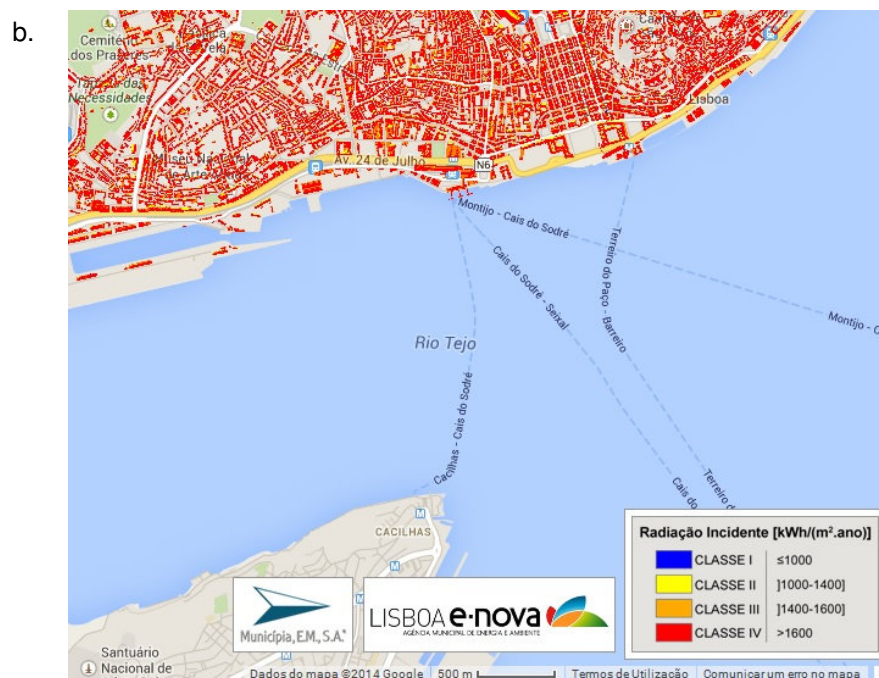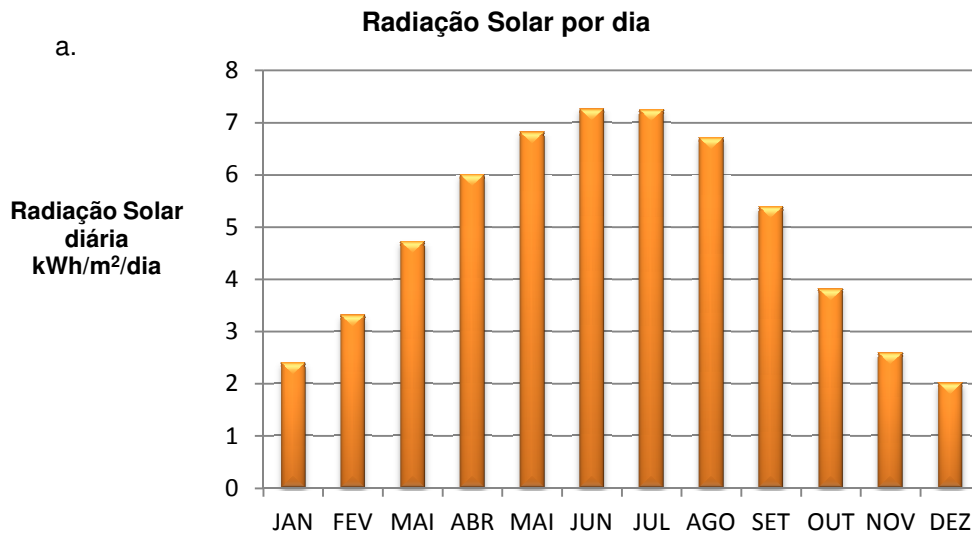
Figura 3.4 – Média da radiação solar diária (a) e anual (b) na área em estudo (Stackhouse, 2014; Magalhães, 2014).

De modo a efetuar o dimensionamento do sistema FV, aplicam-se as seguintes fórmulas:

a) Número de módulos ligados em série = Tensão do sistema FV ÷ Tensão do módulo FV
b) Número de módulos ligados em paralelo = Corrente do sistema FV ÷ Corrente do módulo FV
c) Número total de módulos = Número de módulos ligados em série x Número de módulos ligados em paralelo
d) Potência do sistema FV = Tensão do sistema FV x Corrente do sistema FV

De forma a avaliar a quantidade de energia que um módulo FV pode produzir diariamente, é necessário calcular a energia idealmente produzida (energia teoricamente expectável) pelo mesmo e, posteriormente, calcular a energia efectivamente produzida.

Com base na radiação solar média diária da área de estudo, pode-se calcular a energia ideal (Eideal/dia) produzida pelo sistema FV durante um dia:

- Eideal/dia (kWh/dia) = Radiação solar média diária (kWh/m^2/dia) x Área total do sistema FV (m^2) x η módulo (%)

A mesma fórmula pode ser aplicada a outro período de tempo.

De modo a obter-se a energia real produzida (Ereal) durante um determinado período, aplicam-se os coeficientes de perdas ao valor de energia produzida ideal (Carneiro, 2009). A fórmula seguinte é aplicada ao período anual:

- Ereal (kWh/ano) = Output anual (kWh) x Coeficiente de perdas devido à temperatura (%) x Coeficiente devido à inclinação (%) x Coeficiente de perdas nos componentes (incluindo dimensionamento das cablagens) (%) x Eficiência do inversor (%)

Os custos de manutenção dos módulos FV incluem apenas o pagamento a um trabalhador que, durante 1 a 2 horas, verifique as ligações e a sujidade (Dufo-López *et al.*, 2011).

3.4.2 Cabos eléctricos

É necessário proceder-se ao dimensionamento dos cabos eléctricos, pois as quedas de tensão nos mesmos podem penalizar o rendimento do sistema FV. O cálculo da secção mínima dos cabos eléctricos para ligar os módulos é feito pela seguinte fórmula:

- Secção mínima do cabo (mm^2) = Corrente máxima (A) x Comprimento cabo (m) (condutor positivo + condutor negativo) x Resistividade do cabo (Ωmm^2/m) ÷ Máxima queda de tensão

Relativamente ao resultado, se for necessário arredondar, há que fazê-lo para um valor inteiro superior, equivalente a um cabo que exista no mercado.

Na instalação elétrica de um sistema FV, os cabos devem ser flexíveis e resistentes aos raios ultravioletas, a temperaturas extremas, ao ozono e à absorção de água. Para uma eficaz proteção de curto-circuito, são recomendados cabos isolados monopolares para os condutores positivos e negativos.

3.4.3 Turbinas eólicas

Dependendo dos recursos existentes, a energia eólica pode produzir mais W por cada € investido do que qualquer outra energia renovável. Se não houver vento, não há produção, contudo, enquanto o vento soprar acima de determinado valor (dependendo da turbina eólica) haverá sempre produção – 24 horas, 7 dias por semana (Futurenergy, 2006).

As turbinas eólicas são seleccionadas para serem instaladas no tecto da ponte e, como tal, têm que ter dimensões reduzidas, principalmente a altura e o diâmetro, de forma a minimizar as alterações no deslocamento do navio. É também fundamental manter a estabilidade do mesmo, logo,

as turbinas eólicas têm que ser distribuídas uniformemente, a distâncias idênticas e próximas do meio do navio.

De forma a ter-se conhecimento da produção de energia diária das turbinas eólicas, aplica-se a fórmula:

- Output diário da turbina eólica (Wh/dia) = Potência da turbina eólica correspondente a determinada velocidade do vento (W) x Nº Horas de vento com a respectiva velocidade (h)

A produção de energia da turbina eólica depende da velocidade do vento no local a determinado momento, e das características da própria turbina eólica, de acordo com as seguintes condicionantes (Maleki & Askarzadeh, 2014):

a) Se a velocidade do vento exceder o valor *cut-in* (velocidade do vento a partir da qual a turbina eólica funciona), o gerador da turbina eólica começa a produzir energia;
b) Se a velocidade do vento exceder a velocidade nominal da turbina eólica, esta produz uma potência de saída constante;
c) Se a velocidade do vento exceder o valor *cut-out* (velocidade máxima do vento aceite pela turbina eólica), o funcionamento do gerador de turbina eólica é interrompido para proteger o próprio equipamento.
d) A potência da turbina eólica varia consoante a intensidade do vento no momento.

3.4.4 Baterias

Num sistema híbrido, em que os módulos FV e as turbinas eólicas não garantam a cobertura total das aplicações eléctricas em todas as situações, é indispensável a instalação de baterias. Estas, para além de armazenarem o excesso de energia produzido em determinados momentos, fornecem energia quando há escassez de produção, conseguindo alimentar correntes de pico elevado.

Devido ao comportamento oscilatório das fontes de energia renováveis, a capacidade do banco de baterias altera constantemente no sistema híbrido. Deste modo, a carga das baterias comporta-se da seguinte forma:

a) Quando a produção total de energia dos módulos FV e das turbinas eólicas é superior à energia requerida pelas aplicações eléctricas, o banco de baterias está em estado de carregamento (Maleki & Askarzadeh, 2014).
b) Se, pelo contrário, essa produção não for suficiente, as baterias descarregam.

No banco de baterias deve ser instalado um controlador de carga, para evitar o excesso na entrada e saída de energia nas baterias. A principal função deste regulador de carga é proteger as baterias de serem sobrecarregadas, ou descarregadas profundamente.

O controlador/regulador de carga é um dos principais componentes de um sistema FV, sendo o responsável pela duração da vida útil dos bancos de baterias que são dos componentes mais dispendiosos neste tipo de sistemas.

Os controladores de carga possuem uma série de dispositivos que informam permanentemente sobre o estado de carga do sistema e alertam o utilizador para que este possa

adaptar a instalação às suas necessidades particulares, aumentando assim o tempo de vida útil das baterias (Portal Energia, 2012).

A corrente do controlador deve superar a corrente total dos módulos FV e das turbinas eólicas a serem conectados.

Os díodos de protecção impedem que a corrente entre no módulo e seja toda direccionada para as baterias.

O número mínimo de baterias necessárias é calculado através das fórmulas:

a) Capacidade total necessária (Ah) = Corrente média (A) x intervalo de tempo de funcionamento (h) = Requisitos das aplicações (Wh/dia) x período de armazenamento (Nº dias) ÷ Tensão da bateria
b) Número mínimo de baterias = Capacidade total necessária (Ah) ÷ Capacidade máxima para cada bateria (Ah) ÷ Máxima profundidade de descarga (%)

Se a ligação das baterias for em série, há um aumento da tensão. Se a ligação for em paralelo, há um aumento da capacidade do sistema (intensidade da corrente), mas a tensão terminal continua constante. O agrupamento no banco de baterias pode ainda ser feito em série-paralelo, conforme seja mais conveniente.

O custo de manutenção das baterias inclui o pagamento a um trabalhador para, durante 1 a 2 horas verificar as ligações e recarregar as baterias em eletrólito, se necessário (Dufo-López *et al.*, 2011).

3.4.5 Inversor

Por se tratar de um sistema autónomo, o conversor terá incluído um inversor autónomo, de forma a criar uma tensão alternada a partir da energia acumulada nas baterias.

Estes equipamentos possuem um factor de eficiência ou potência (FP) que é dado em proporção à perda do próprio circuito. O inversor é definido pela tensão de trabalho (entrada) dos módulos FV em corrente contínua e pela tensão de saída.

O inversor deve ter potência suficiente para superar a potência do consumo dos equipamentos e, para tal, deve-se verificar o consumo do pico de carga.

3.4.6 Gerador a *diesel*

O gerador a *diesel* é uma fonte de reserva de energia eléctrica, que é independente da meteorologia, isto é, dos recursos renováveis de energia (Dufo-López *et al.*, 2011).

Neste trabalho considerou-se o gerador a *diesel* já utilizado no “LISBONENSE”, aproveitando assim os equipamentos existentes, isto é, sem aquisição de novos geradores, atendendo à idade recente do navio e ao custo-benefício do projecto. Na realidade o navio possui dois geradores iguais, o de bombordo e o de estibordo, cuja finalidade é serem utilizados alternadamente e como redundância um do outro. No intuito de simplificar este trabalho, assumiu-se a existência de apenas um gerador, em que é sempre utilizado o mesmo.

O modelo do gerador é Caterpillar C4.4 DITA (figura 3.5), com uma potência máxima de saída de 65 kW.

Figura 3.5 – Gerador Caterpillar C4.4 DITA (Caterpillar, 2007).

O gerador a *diesel* começa a funcionar quando a energia produzida pelas fontes de energia renováveis e pelas baterias não é suficiente.

O consumo de combustível do gerador a *diesel* depende da potência de saída. São apresentados na tabela 3.4 os principais valores para o gerador do "LISBONENSE".

Tabela 3.4 – Consumo de *diesel* pelo Gerador Caterpillar C4.4 DITA (Transtejo a))

Potência de saída (elétrica) (kW)	Carga (%)	Potência de entrada (mecânica) (kW)	Consumo (L/h)
65	100	75.4	19.3
58.5	90	67.9	17.4
52	80	60.6	15.5
48.8	75	57.0	14.6
45.5	70	53.4	13.7
39	60	46.3	11.9
32.5	50	39.3	10.2
26	40	32.5	8.6
19.5	30	25.7	7
16.2	25	22.3	6.3
13	20	18.8	5.5
6.5	10	11.5	4

Pode-se constatar que o consumo do gerador a uma carga de 50 % da potência de saída é de 10.2 L/h, equivalente a 32.5 kW; do qual se obtém um consumo de 0.314 L/kWh.

Considerando que o custo de manutenção do gerador é 1 €/hora, reduzida a 1 hora por dia, o custo anual é cerca de 365 €.

3.5 Análise económica do projecto do sistema híbrido

De forma a completar o aperfeiçoamento do sistema híbrido FV/eólico/*diesel* proposto, é necessário realizar uma análise económica do projecto, com o objectivo de optimizar os investimentos.

3.5.1 Tempo de vida do projecto

O tempo de vida do projecto será o período de vida esperado para os investimentos, para além do qual haveria necessidade de realizar novos investimentos para dar continuidade ao projecto (Abecassis & Cabral, 2010). Assim, há que ter em consideração a previsão de vida física de todos os componentes do sistema híbrido.

3.5.2 Fluxos monetários

Os fluxos de base que serão necessários ter em conta para avaliar a rentabilidade do projecto, ao longo do seu ciclo de vida, são: os custos de investimento, os custos de exploração/manutenção e as receitas.

Torna-se essencial elaborar um plano de investimentos com a descrição e organização temporal dos investimentos previstos, incluindo substituições de material. Adicionalmente, há que obter um plano de exploração com a descrição e organização temporal dos custos de exploração e manutenção, tais como mão-de-obra e consumíveis de manutenção; e das receitas previstas, que terão em consideração os preços do mercado (Abecassis & Cabral, 2010).

Todos os componentes apresentados neste trabalho foram alvo de estudo de mercado, do qual resultou uma seleção com base na análise do custo-benefício.

3.5.3 Análise de viabilidade

De forma a poder comprovar se um projecto é válido ou não, é fundamental considerar o factor tempo através de métodos de actualização, que permitem comparar o valor de uma unidade monetária no presente e no futuro. Assumindo que “uma unidade monetária já” é trocada por $(1+i)^n$ unidades monetárias no ano “n”, em que “i” é a taxa de actualização (Abecassis & Cabral, 2010):

- $R = R0 + R1\left(\frac{1}{1+i}\right) + R2\left(\frac{1}{1+i}\right)^2 + \ldots + Rn\left(\frac{1}{1+i}\right)^n$, em que R representa o rendimento total calculado a partir de uma série de rendimentos anuais.

Os critérios de rentabilidade assentes em métodos de actualização são os seguintes (Abecassis & Cabral, 2010):

- Valor Actualizado Líquido (VAL) – Somatório dos *Cash-Flow* anuais, actualizados a determinada taxa (i):
  - VAL = $\sum_{t=0}^{n} \frac{\text{Rt-Ct-It}}{(1+i)^t}$, em que Rt, Ct e It representam, respectivamente, as receitas, os custos de exploração/manutenção e os custos de investimento do projecto.
  - Se o resultado de VAL for positivo, a decisão de investir no projecto é promissora; caso contrário, o projecto não justifica o investimento.
- Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) – Determina a taxa de actualização (i) que permite igualar o valor actual do somatório dos *Cash-Flow* de exploração ao dos investimentos;
  - Este valor de "i" corresponde a um VAL = 0
  - Cálculo da TIR: 0 = $\sum_{t=0}^{n} \frac{\text{Rt-Ct-It}}{(1+i)^t}$
  - Quanto maior for a TIR mais justificável se torna o projecto; sendo utilizada quando existem diferentes projectos e a taxa de actualização é desconhecida.
- Período de Recuperação do Capital (PRC) – Determina o período de tempo entre a concretização do investimento e a sua recuperação através da exploração.
  - É o ponto em que a sequência de fluxos de despesas e investimentos é igual à sequência de fluxos monetários recebidos;
  - PRC = total de anos para que se verifique a igualdade: $\sum_{t=0}^{t} \frac{\text{It}}{(1+i)^t} = \sum_{t=0}^{t} \frac{\text{Rt-Ct}}{(1+i)^t}$, em que "t" é o número de anos.
  - Para calcular o PRC, acumulam-se os VAL ano a ano, até o mesmo ser igual a zero.

3.5.4 Custo energético

Para calcular o custo energético do sistema proposto é necessário dividir o Valor Actualizado Líquido pela quantidade de energia produzida, podendo também ser especificado o custo de energia proveniente de uma determinada fonte.

4. Caracterização Energética do Navio em Estudo

A fim de caracterizar o nível de emissões poluentes provenientes do navio "LISBONENSE", foi calculado o seu EEDI. A tabela 4.1 apresenta os valores a incluir na fórmula.

O navio em estudo, obedecendo às instruções da IMO, é considerado um navio de passageiros por ter capacidade de transportar mais de 12 passeiros, o que está definido no regulamento 2 do capítulo 1 do SOLAS (MEPC.1/Circ.681). No entanto, há que considerar o transporte de viaturas (máximo de 29), apesar do seu desempenho diário estar direccionado para o transporte de pessoas.

Tabela 4.1 – Parâmetros para o cálculo do EEDI (Transtejo b))

Parâmetro	Valor
$C_{FME} = C_{FAE}$	3.206g CO_2/g *diesel*, tendo como base um teor de carbono de 0.875.
V_{ref}	11 nós (nm/h)
Capacidade (tonelagem de arqueação bruta)	150 t
Peso Bruto	630 – 440 = 190 t
P	P ME = 0.75 * 634 = 475.5 P AE = 65 kW
P_{PTI}	634 * 0.75 / 0.7 = 679.29 kW
P_{eff}	0
P_{AEeff}	0
SFC_{ME}	205.3 g/kWh
SFC_{AE}	211.4 g/kWh
Fj	1 (por não operar no gelo)
Fw	1 (no local de operação do "LISBONENSE", considera-se que o estado do mar é calmo).
Feff	0
Fi	1 (por não operar no gelo)
Fc	1

Aplicando a fórmula:

$$\frac{\left(\prod_{j=1}^{M} fj\right)\left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)}\right) + \left(P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}\right) + \left(\left(\prod_{j=1}^{M} fj \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(I)}\right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE}\right) - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(I)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}\right)}{fi \cdot fc \cdot capacidade \cdot V_{Ref} \cdot fw}$$

= 964.10 g/ t. nm

Apesar de existirem diferentes valores tabelados para o cálculo do EEDI requerido pela IMO, nenhum deles é aplicável ao navio em estudo. Só é exigido o EEDI obtido através dos valores tabelados nos navios com tonelagem de arqueação bruta superior a 400 t.

Contudo, o cálculo do EEDI efectuado é fundamental para a avaliação das emissões de CO_2 por unidade de trabalho; e é a base de comparação para um novo EEDI, a ser calculado após simulação da implementação do sistema híbrido em estudo.

Com o objectivo de controlar a eficiência energética do "LISBONENSE", foi calculado o seu EEOI para determinado número de viagens efectuadas num dia útil de trabalho, conforme parâmetros da tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros para o cálculo do EEOI (Transtejo b))

Parâmetro	Valor
i	20 viagens
j	*diesel*
FC	0.041 t por viagem
Cf	3.206 t CO_2/t *diesel*, tendo como base um teor de carbono de 0.875.
$m_{carga\ em\ 10\ viagens}$	360 passageiros ou 29 viaturas
$m_{carga\ em\ 10\ viagens}$	180 passageiros ou 15 viaturas
Di	0.96 milhas náuticas

Utilizou-se cargas diferentes para cada metade do número de viagens, devido às oscilações que ocorrem na utilização do navio em termos de carga (passageiros e viaturas).

$$EEOI = \frac{\sum_i \sum_j (FC_{ji} \times CF_j)}{\sum_i (m_{carga,i} \times D_i)}$$ = 0.571 x 10^{-3} t CO_2/passageiros. milhas náuticas ou

= 6.925 x 10^{-3} t CO_2/viaturas. milhas náuticas

Estes valores só terão utilidade se forem calculados frequentemente como, por exemplo, todos os dias de utilização do navio; de forma a ser efectuada uma monitorização das emissões de CO_2 emitidas pelo navio durante a sua operação.

5.1 Configuração do sistema híbrido

A configuração do sistema híbrido proposto na presente dissertação consiste na seguinte:

- Um sistema FV constituído por determinado número de módulos, ligado ao barramento DC do navio a 390 V;
- Um sistema eólico constituído por determinado número de turbinas eólicas, ligado ao barramento DC do navio a 24 V;
- Um conjunto de baterias nos barramentos DC para armazenar a energia produzida pelos sistemas FV e eólico;
- Um controlador de carga entre o sistema FV e o banco de baterias;
- Um controlador de carga entre cada turbina eólica e o banco de baterias;
- Um inversor (constituído por uma ou mais unidades), que converte a corrente DC a 390 V em AC a 400 V, correspondente ao barramento AC do navio;
- Um gerador a *diesel* ligado ao barramento AC de 400 V do navio;
- Um sistema de controlo e monitorização que permite gerir e controlar os subsistemas de energia, incluindo o gerador a *diesel*.
- Se a produção de energia proveniente dos sistemas FV e eólico, exceder as necessidades eléctricas do navio, o excesso carrega o banco de baterias até os controladores de carga dos subsistemas permitirem;
- Se, por sua vez, esta produção de energia não for suficiente para satisfazer a totalidade das necessidades das aplicações eléctricas, assumindo que o banco de baterias se encontra descarregado até ao mínimo aceite pelo utilizador do sistema, o gerador a *diesel* inicia a produção de energia eléctrica e fornece a quantidade remanescente.

5.2 Componentes do sistema híbrido FV/eólico/*diesel*

De modo a proceder-se à selecção dos componentes mais adequados para a proposta do sistema híbrido a instalar no "LISBONENSE", foi necessário obter informação rigorosa sobre o espaço disponível para colocar painéis FV e turbinas eólicas. Para além da planta apresentada na figura 5.1. a signatária capturou imagens desse mesmo espaço, representadas nas figuras 5.2. 5.3 e 5.4.
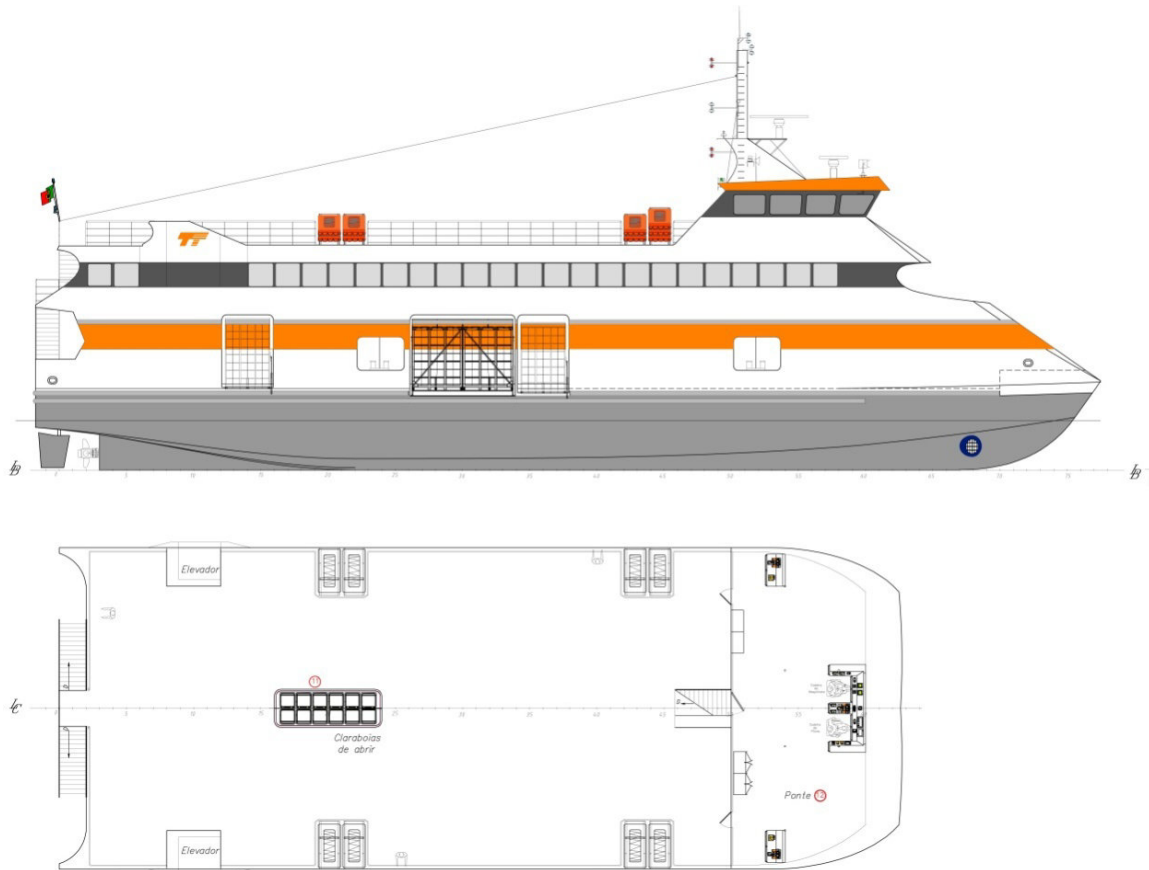
Figura 5.1 – Planta do “LISBONENSE”.

Figura 5.2 – Convés do solário do “LISBONENSE”.

Figura 5.3 – Objectos a considerar no cálculo da área útil do convés do solário: conjunto de jangadas salva-vidas e clarabóia.

Figura 5.4 – Tecto da Ponte.

5.2.1 Módulos FV

Considerando que a área útil do convés do solário é a área disponível para a instalação dos painéis FV do sistema híbrido, a tabela 5.1 apresenta os valores necessários para calcular a mesma, e o respectivo resultado. Para tal, é necessário subtrair as áreas dos objectos que se encontram actualmente no convés do solário e dos corredores que serão indispensáveis para efectuar a eventual manutenção dos módulos FV, para permitir o acesso ao tecto da ponte do navio e por questões de segurança, incluindo o acesso às bóias e às jangadas salva-vidas.

Tabela 5.1 – Parâmetros para o cálculo da área útil do convés do solário

Parâmetro	Área
Largura do convés do solário	15 m
Comprimento do convés do solário	22.4 m
Área total do convés do solário	336 m^2
4 Conjuntos de jangadas salva-vidas	4 x 4.5 m^2 = 18 m^2
1 Clarabóia	8 m^2
Corredores e espaços de segurança e manutenção	50 m^2
Área útil do convés do solário	260 m^2

Aproveitando os produtos vendidos em Portugal, seleccionou-se um tipo de módulos FV comercializados por uma empresa portuguesa, a Lobosolar.

Atendendo à energia eléctrica exigida pelos equipamentos de bordo, optou-se por um tipo de módulos com potência elevada (figura 5.5). As especificações dos mesmos estão na tabela 5.2. Cada módulo inclui 60 células e tem a capacidade de manter 90 % da sua potência nominal durante 10 anos e 80 % durante 25 anos.

Tabela 5.2 – Especificações técnicas do módulo FV em estudo (Open Renewables, 2013)

Especificação	Valor	Especificação	Valor
Modelo	255-PQ60	T (NOCT)	48.0 °C
Pn	255 Wp	P (NOCT)	183 W
Pmax	255 W	Voc (NOCT)	34.89 V
η	15.5 %	Isc (NOCT)	6.85 A
Vsys	1000 Vdc	Vmpp (NOCT)	27.40 V
Vmpp	30.00 V	Tecnologia	Silício Policristalino
Impp	8.5 A	Altura	40 mm
Voc	38.00 V	Área	1.64 m^2
Isc	9.00 A	Comprimento	1.660 m
Ir	20 A	Largura	0.988 m
Tipo Conector	TE Solarlok / MC4	Peso	22 Kg
Díodos de Bypass	3	C do cabo	1000 mm
Preço	205.13 €	Secção do cabo	4 mm^2

Figura 5.5 – Módulo FV 255-PQ60 (Open Renewables, 2013)

A figura 5.6 apresenta a curva característica do módulo em estudo, elaborada com base nos valores do fornecedor (Open Renewables, 2013). O valor da tensão a considerar para cada módulo FV é 30 V, o que corresponde a uma corrente de 8.5 A.
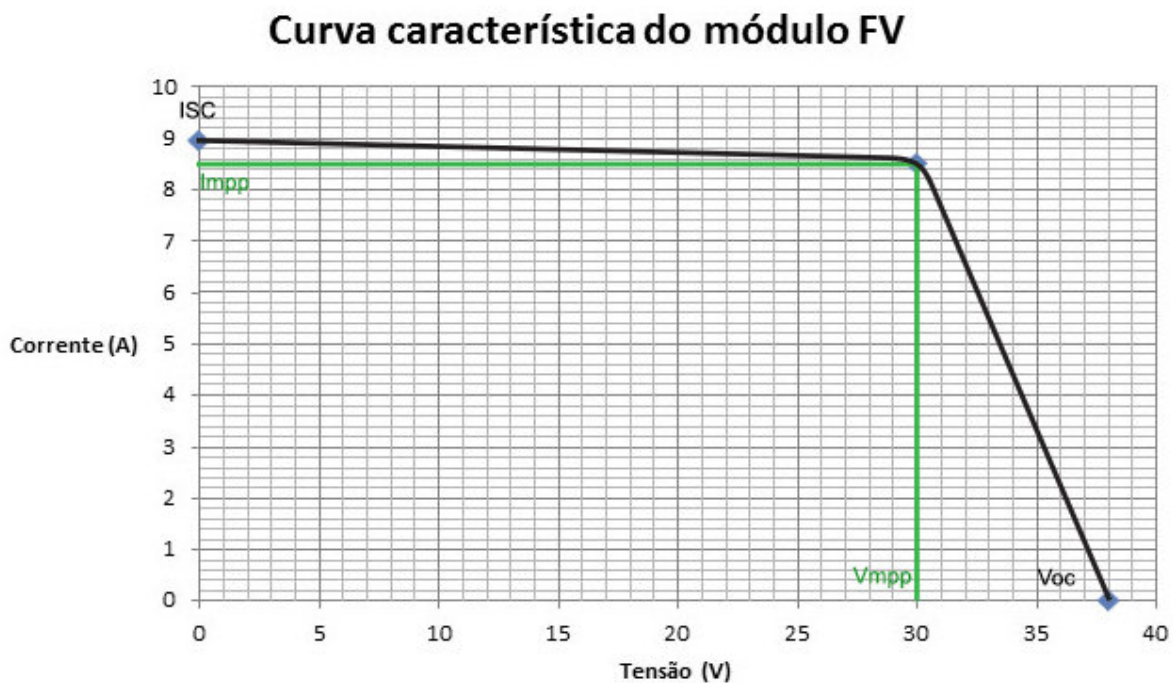
Figura 5.6 – Curva característica dos módulos FV 255-PQ60 (Open Renewables, 2013).

A orientação dos módulos no navio é fixa, no entanto, perante a energia solar, varia constantemente porque os percursos diários têm direcções Norte-Sul e Sul-Norte, em igual número; ou seja, o navio está constantemente a inverter a orientação. Assim, quando o “LISBONENSE” efectua o percurso entre o Cais do Sodré e Cacilhas (Norte-Sul), o azimute dos módulos é 178º; e quando efectua o percurso em sentido contrário (entre Cacilhas e o Cais do Sodré) o azimute é 002º.

Relativamente à inclinação, pelo mesmo motivo apresentado no parágrafo anterior, deve ser tão reduzida quanto possível. Assumiu-se um valor de 15º para evitar sombreamentos e acumulação de sujidade e de água.

A máxima área disponível para instalação dos módulos FV equivale a 260 m^2, e estes têm que ser adaptados consoante o comprimento e a largura dos mesmos e do convés do solário, evitando os objectos lá existentes. Adicionalmente, essa disposição tem que ser conciliada com os corredores de segurança e de manutenção dos módulos FV, de forma a estarem permanentemente acessíveis.

Assim, com base na planta do convés do solário e nas características do módulo seleccionado, obteve-se o número de módulos possível de instalar, assim como as respectivas posições, como se verifica na figura 5.7. A distribuição foi feita através do *software* Adobe Photoshop CC 2014, com a escala ajustada.
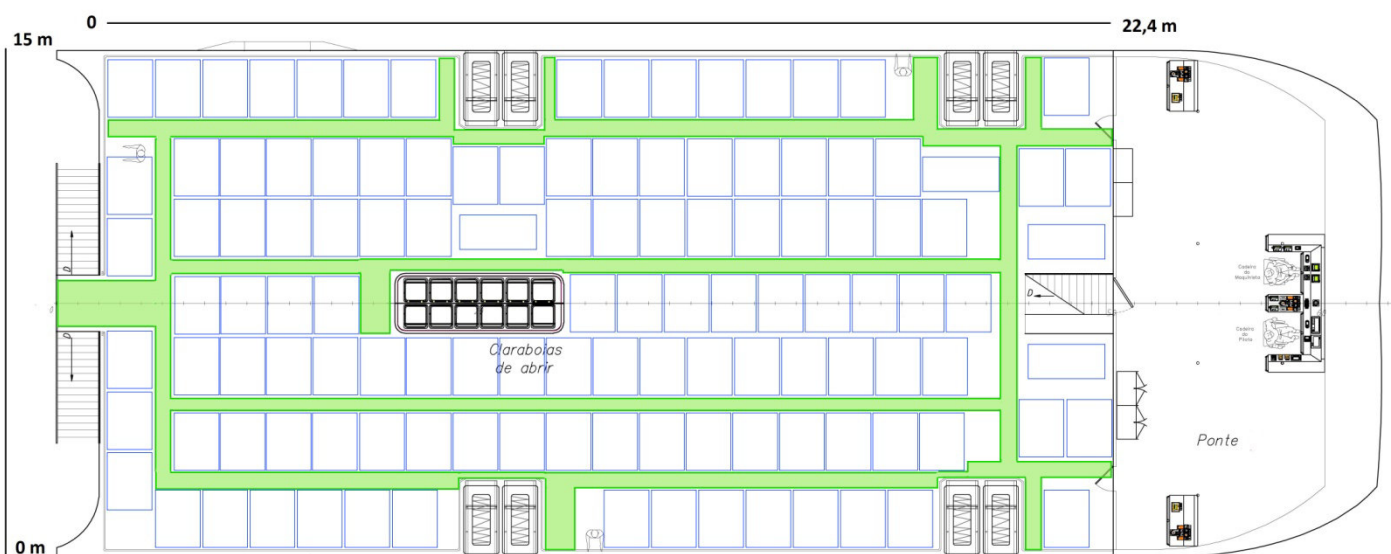
Figura 5.7 – Disposição dos módulos FV 255-PQ60 no convés do solário do “LISBONENSE”.

Constatou-se que o navio só tem capacidade, relativamente ao espaço disponível, para instalar 120 módulos FV do modelo 255-PQ60.

Como a tensão das aplicações eléctricas do navio são 400 V e a corrente 75 A, os módulos têm que ser ligados de forma a aumentar a sua tensão individual de utilização (30 V), diminuindo assim as perdas de energia através do sistema, incluindo no banco de baterias e no inversor. Para tal, os módulos FV têm que ficar ligados em associações série-paralelos. Adicionalmente, evita-se um aumento exagerado da intensidade de corrente que iria exigir cabos com secção maior,

representando um constrangimento para o navio em estudo. Assim, calcula-se o número de módulos ligados em série e em paralelo:

a) Número de módulos ligados em série = 400 V ÷ 30 V = 13.3 ≈ 14 módulos
b) Número de módulos ligados em paralelo = 75 A ÷ 8.5 A = 8.8 módulos ≈ 9 módulos

Como os módulos têm que constituir números inteiros, arredondaram-se os valores para cima, pois os valores abaixo não seriam suficiente. Assim:

c) Número total de módulos = 14 x 9 = 126 módulos
d) Tensão do sistema FV = 14 x 30 V = 420 V
e) Corrente do sistema FV = 9 x 8.5 A = 76.5 A
f) Potência do sistema FV = 420 V x 76.5 A = 32 130 W

Contudo, o navio não tem capacidade para instalar 126 módulos e, por outro lado, pode-se aproximar mais a tensão do sistema FV aos 400 V. Reformulando, através da redução de 1 módulo em série:

a) 13 Módulos ligados em série
b) 9 Módulos ligados em paralelo
c) Número total de módulos = 13 x 9 = 117 módulos
d) Tensão do sistema FV = 13 x 30 V = 390 V
e) Corrente do sistema FV = 9 x 8.5 A = 76.5 A
f) Potência do sistema FV = 390 V x 76.5 A = 29 835 W

Na tabela 5.3 apresenta-se o resultado do cálculo da energia que o sistema FV tem capacidade de produzir por dia, mês e ano, tendo em consideração as características do módulo – área (1.64 m^2), eficiência (15.5 %), inclinação e azimute – e o número de unidades (117). Os valores da radiação solar no local e inclinada foram retirados dos dados de Stackhouse, 2014.

Tabela 5.3 – Energia produzida pelo sistema FV de 117 módulos

Mês	Radiação Solar no local ($kWh/m^2/dia$)	Radiação Solar inclinada N-S ($kWh/m^2/dia$)	Radiação Solar inclinada S-N ($kWh/m^2/dia$)	Radiação Solar média inclinada ($kWh/m^2/dia$)	Total mensal (kWh/mês)	Total anual (kWh)
Janeiro	2.40	3.19	1.54	2.36	2178.56	52 448.47
Fevereiro	3.31	4.04	2.41	3.23	2975.62	
Março	4.72	5.34	3.86	4.60	4242.96	
Abril	6.00	6.34	5.38	5.86	5406.75	
Maio	6.82	6.85	6.45	6.65	6129.73	
Junho	7.26	7.15	7.00	7.08	6524.27	
Julho	7.25	7.20	6.93	7.06	6513.79	
Agosto	6.71	6.94	6.15	6.55	6034.63	
Setembro	5.39	5.94	4.56	5.25	4843.02	
Outubro	3.81	4.51	2.92	3.72	3425.75	
Novembro	2.59	3.35	1.73	2.54	2341.89	
Dezembro	2.01	2.70	1.27	1.99	1831.51	

A tabela 5.4 apresenta o cálculo do Output médio diário do módulo FV, com uma corrente da carga do módulo de 8.5 A. Os valores utilizados são referentes à radiação média solar inclinada (kWh/m^2/dia) na área de estudo (tabela 5.3).

Tabela 5.4 – Cálculo do Output médio diário do módulo FV em estudo

Mês	Output médio diário do módulo FV (Wh/dia)
Janeiro	8.5 A x 2.36 h x 30 V = 601.80
Fevereiro	8.5 A x 3.23 h x 30 V = 823.65
Março	8.5 A x 4.60 h x 30 V = 1173
Abril	8.5 A x 5.86 h x 30 V = 1494.30
Maio	8.5 A x 6.65 h x 30 V = 1695.75
Junho	8.5 A x 7.08 h x 30 V = 1805.40
Julho	8.5 A x 7.06 h x 30 V = 1800.30
Agosto	8.5 A x 6.55 h x 30 V = 1670.25
Setembro	8.5 A x 5.25 h x 30 V = 1338.75
Outubro	8.5 A x 3.72 h x 30 V = 948.60
Novembro	8.5 A x 2.54 h x 30 V = 647.70
Dezembro	8.5 A x 1.99 h x 30 V = 507.45

Considerando o valor de energia total anual, produzida pelo sistema FV, presente na tabela 5.3; e uma eficiência de carga da bateria de 80 %, obteve-se os requisitos diários das aplicações, satisfeitos pelo sistema FV:

- Requisitos diários das aplicações = 52 448.47 kWh ÷ 365 dias x 0.8 = 114.956 kWh/dia

Calculando a energia real produzida durante um ano:

- Coeficiente de perdas devido à temperatura = [1 - 0.005 x (17.4 °C – 25ºC)] = 93 %
    - Temperatura média em Lisboa no ano de 2013: 17.4 °C (WeatherOnline Ltd, 2014)
- Coeficiente devido à inclinação = 95 %
- Coeficiente de perdas nos componentes = 95 %
- Eficiência do inversor = 97 %
- Ereal/ano (kWh/ano) = 52 448.47 kWh x 0.93 x 0.95 x 0.95 x 0.97 = 42 700.67 kWh

Calculando a energia real produzida por dia:

- Média da Eideal/dia = 4.741 (kWh/m^2/dia) x 117 módulos x 1.64 m^2 x 0.155 = 141 kWh
- Média da Ereal/dia (kWh/dia) = 141 kWh x 0.93 x 0.95 x 0.95 x 0.97 = 114.79 kWh

Assumindo que será um elemento da Transtejo a efectuar a manutenção dos módulos, que consiste na verificação das ligações e da sujidade, não haverá custos adicionais para esta manutenção.

5.2.2 Cabos eléctricos

No intuito de calcular a secção dos cabos a utilizar, efetuam-se os seguintes cálculos:

a) Queda de tensão máxima limitada a 5 % = 0.05 x 390 V = 19.5 V
b) Imax = 76.5 A
c) Comprimento do cabo (positivo + negativo):
    - [Painel FV; baterias] = 20 m
    - [Baterias; inversor] = 5 m
    - [Inversor; barramento de CA] = 5 m
d) Secção mínima do cabo (mm^2) = 76.5 A x 30 m x 0.04 $\Omega mm^2/m$ ÷ 19.5 V = 4.71 mm^2

Segundo as secções de cabos existentes (padrão), o valor mais próximo e superior corresponde ao cabo com secção de 6 mm^2. Assim, será necessário adicionar 30 m de cabo com esta secção ao sistema.

Do estudo feito aos cabos existentes, constituídos por um mono condutor isolado e secção de 6 mm^2, constata-se que um modelo adequado para o sistema em estudo é o PV1-F. As características encontram-se na tabela 5.5 e figura 5.8.

Tabela 5.5 – Especificações técnicas do cabo eléctrico (Quickbit, 2014)

Especificação	Valor
Modelo	PV1-F
Alma condutora	Cobre flexível
Isolamento	PVC
Bainha exterior	PVC
Preço	0.95 €/m
Ciclo de vida	25 anos

Figura 5.8 – Cabo eléctrico PV1-F para sistemas FV (Quickbit, 2014).

5.2.3 Turbinas eólicas

As turbinas eólicas serão instaladas no tecto da ponte, nas proximidades do mastro. As especificações técnicas da turbina eólica seleccionada para o estudo estão na tabela 5.6. podendo ser observada na figura 5.9.

Tabela 5.6 – Especificações técnicas da turbina eólica em estudo (Futurenergy, 2006)

Especificação	Valor
Modelo	FE1024U 24V
Potência nominal	1000 W
Potência máxima	1142 W
Tensão	24 V
Corrente	30 A
Corrente máxima	34 A
Diâmetro Rotor	1.8 m
Número de pás	5
Peso	22 Kg
Preço	1255 €
Velocidade *cut-in* (mínima)	2 m/s
Velocidade de produção de energia constante	3 m/s
Velocidade *cut-out* (máxima)	50 m/s
Altura	7.5 m
Ciclo de vida	20 anos

Como a altura do tecto da ponte são 10.57 m em relação à linha de água, a altura total da turbina eólica é 18.07 m.

Figura 5.9 – Turbina eólica FE1024U 24V (Better Generation Group Ltd, 2012)

Com base na planta do tecto da ponte e nas características da turbina eólica seleccionada, obteve-se o número de turbinas eólicas possível de instalar, assim como as respectivas posições. Esta disposição verifica-se na figura 5.10. elaborada através do *software* Adobe Photoshop CC 2014, com a escala ajustada.
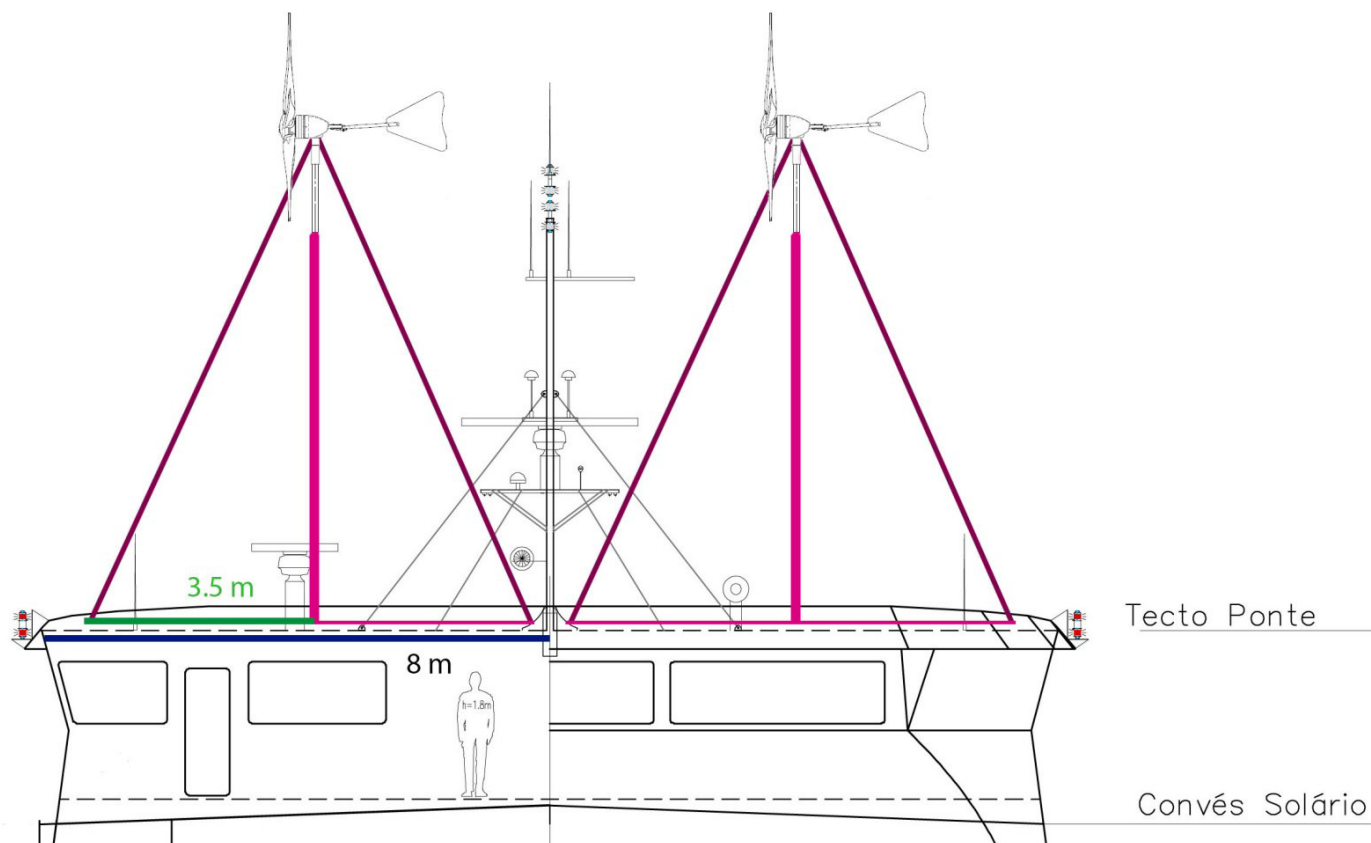
Figura 5.10 – Vista frontal. Disposição das turbinas eólicas FE1024U 24V no tecto da ponte do "LISBONENSE".

Pode-se constatar que, no máximo, pode-se instalar duas turbinas eólicas FE1024U 24V no tecto da ponte do "LISBONENSE". As dimensões são limitadas porque a fixação de cada turbina eólica é feita por quatro pontos: dois pontos laterais que se encontram distanciados do eixo central em 3.5 m (figura 5.10) e dois pontos no sentido longitudinal do navio, que se encontram distanciados do eixo central em 3.0 m, pois o comprimento do tecto da ponte são 6 m.

A turbina eólica FE1024U 24V permite produção de energia contínua a partir de uma velocidade de vento de 3 m/s. Se a velocidade do vento nunca for inferior a este valor, existe produção de energia durante 24 horas por dia. A turbina eólica atinge uma produção superior a 1000 W com ventos constantes de 12.5 m/s, como se pode verificar no gráfico da figura 5.11.
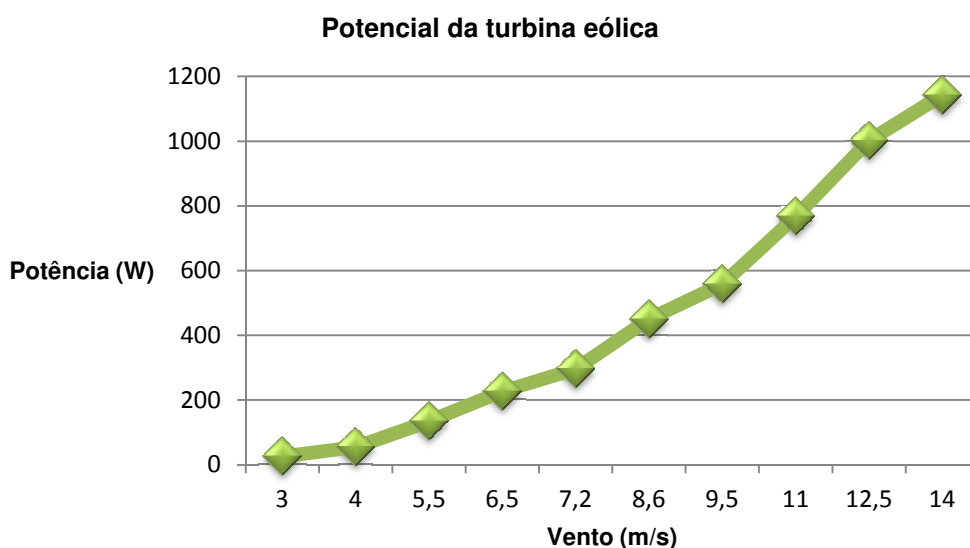
Figura 5.11 – Energia produzida pela turbina eólica FE1024U 24V (Futurenergy, 2006).

Com base na informação do gráfico anterior, calculou-se o Output médio diário da turbina eólica através das potências correspondentes às velocidades do vento no local, cujos resultados constam na tabela 5.7.

Os registos horários, entre 1 de janeiro e 31 de dezembro de 2013, do vento no local de estudo, foram fornecidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera e pelo Instituto Hidrográfico (Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2014; Instituto Hidrográfico, 2014). Com base nesta informação:

a) Apurou-se o número de horas em cada dia em que o vento soprou acima dos 3 m/s, excluindo as restantes (gráficos do Anexo A);
b) Calculou-se a média da velocidade do vento para cada dia (gráficos do Anexo A);
c) Com base nos valores da potência da turbina eólica (figura 5.11), calculou-se o output diário (Wh/dia) de cada uma;
d) Obteve-se, para cada mês, a média do output diário (Wh/dia) de cada turbina eólica;

No entanto, é necessário incluir o deslocamento do navio, pois é a navegar que os equipamentos consomem energia eléctrica do gerador ou, no caso deste estudo, de todas as fontes de energia. A velocidade de serviço do navio são 11 nós, o que equivale a 5.6 m/s. Com base neste valor, calculou-se um novo output médio diário. Este valor foi tido em consideração apenas nas horas do dia em que o "LISBONENSE" navega. Os resultados são apresentados na tabela 5.7. que incluem o output médio diário das duas turbinas eólicas.

O deslocamento do navio, que provoca este aumento do output médio diário, irá também aumentar o consumo de *diesel* pelo sistema de propulsão, devido ao atrito apresentado pelas turbinas eólicas; no entanto, este consumo e o respectivo acréscimo não estão incluídos no presente estudo.

Tabela 5.7 – Cálculo do Output médio diário da turbina eólica em estudo

Mês	Output médio diário da turbina eólica (Wh/dia)	Output médio diário (Wh/dia) incluindo deslocamento	Output das duas turbinas eólicas (Wh/dia)
Janeiro	430.83	1296.03	2592.06
Fevereiro	369.52	1234.72	2469.44
Março	654.36	1519.56	3039.12
Abril	515.52	1380.72	2761.44
Maio	423.19	1288.39	2576.78
Junho	398.64	1263.84	2527.68
Julho	226.74	1091.94	2183.88
Agosto	265.88	1131.08	2262.16
Setembro	370.65	1235.85	2471.70
Outubro	262.14	1127.34	2254.68
Novembro	358.24	1223.44	2446.88
Dezembro	495.65	1360.85	2721.70
Média	397.61	1262.81	2525.63

Quanto à manutenção das turbinas eólicas, esta consiste na verificação dos lubrificantes e substituição, caso necessário. Sendo esta operação efectuada por um elemento da Transtejo, o custo representa o óleo substituído. Um modelo de lubrificante aplicável a estes sistemas é o SKF LGGB 2, cujo preço é 20 €. Este lubrificante é biodegradável e de baixa toxicidade, sendo adequado para aplicações com preocupação ambiental (SKF, 2008).

5.2.4 Baterias

Propõe-se a instalação de um banco de baterias, com capacidade para ser carregado através do sistema FV e do sistema eólico, e para fornecer energia às aplicações eléctricas do navio.

As características da bateria seleccionada (figura 5.12) encontram-se na tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Especificações técnicas da bateria (CSPower, 2014)

Especificação	Valor
Modelo	CSPOWER CG12-300
Material	Gel
Capacidade nominal	300 Ah
Máxima profundidade de descarga	80 %
Tensão nominal	12 V
Peso	73 Kg
Dimensão	520 mm x 268 mm x 243 mm
Preço	151 €
Ciclo de vida	20 anos

Figura 5.12 – Bateria CSPOWER CG12-300 (CSPower, 2014)

A nível de manutenção, este tipo de baterias dispensa revisão do nível de eletrólito por adição de água destilada, durante a sua vida útil, pois encontram-se seladas. Assumindo que será um elemento da Transtejo a efectuar a manutenção das baterias, que consiste apenas na verificação das ligações, não existem custos adicionais.

De acordo com as necessidades energéticas do "LISBONENSE", e o período de operação diário, aplicaram-se as respectivas fórmulas para obter o número de baterias necessário:

a) Requisitos diários das aplicações alimentadas pelo sistema FV = 117 903 Wh/dia
b) Capacidade total necessária (Ah a 12 V) = 117 903 Wh/dia x 1 dia ÷ 12 V = 9 825.17 Ah
c) Número mínimo de baterias = 9 825.17 Ah ÷ 300 Ah ÷ 0.8 = 40.94 ≈ 41 baterias

Atendendo à tensão do sistema FV (390 V), o banco de baterias tem que ter uma tensão semelhante, de modo a diminuir as perdas de energia. Optando-se por totalizar os 390 V, calcula-se o número de baterias em série e em paralelo:

a) Número de baterias em série = Tensão do sistema ÷ Tensão da bateria = 390 ÷ 12 = 32.5 ≈ 33 baterias em série
b) Número de baterias em paralelo = Total baterias ÷ Número de baterias em série = 41 ÷ 33 = 1.24 ≈ 2 baterias em paralelo.
c) Total de baterias = 33 x 2 = 66 baterias

Como o número total de baterias é muito superior ao mínimo necessário, propõe-se a instalação apenas de baterias em série e nenhuma em paralelo:

d) Correção do total de baterias = 33 baterias em série

Existem sempre equipamentos a consumir energia durante as horas de navegação, logo, muito dificilmente as baterias conseguem carregar todas a 100 %, não existindo necessidade de instalar baterias em paralelo.

Relativamente ao sistema eólico, calculou-se o número de baterias necessárias, de acordo com o output médio diário de cada turbina eólica:

a) Capacidade total necessária (Ah a 12 V) = 1262.81 Wh/dia x 1 dia ÷ 12 V = 105.23 Ah
b) Número mínimo de baterias = 105.23 Ah ÷ 300 Ah ÷ 0.8 = 0.44 ≈ 1 bateria
c) Número de baterias em série = Tensão da turbina eólica ÷ Tensão da bateria =

= 24÷ 12 = 2 baterias em série

Assim, cada turbina eólica é ligada a 2 baterias em série, que se encontram inseridas no banco de baterias constituído pelas 33 unidades. Não existe necessidade de acrescentar novas baterias para cada turbina eólica, pois a probabilidade de o carregamento do banco de baterias ser total é muito reduzida, devido ao consumo energético no navio. Este carregamento total só se deve verificar quando o navio está atracado, no entanto, esta situação dispensa a autonomia das baterias.

A existência de controladores de carga e o facto de a corrente ser contínua evitam valores diferentes de carga entre as baterias.

O local seleccionado para instalação das baterias é o espaço da casa das máquinas do “LISBONENSE”, cuja planta (figura D.1) se encontra no Anexo D. É o espaço adequado para o efeito pois assim o centro de gravidade baixa devido ao peso das baterias, e se subisse seria um factor de risco para a estabilidade do navio. Por outro lado, é um espaço com área suficiente para as 33 baterias, em que circulam apenas os responsáveis pelo espaço e não há passageiros.

5.2.4.1 Controlador de carga do sistema FV

Propõe-se a instalação de um controlador de carga para o sistema FV com o intuito de integrar e controlar a energia de forma inteligente, protegendo as baterias de cargas e descargas excessivas. As características do controlador de carga do sistema FV (figura 5.13) encontram-se na tabela 5.9. Este equipamento, com elevada eficiência, é direccionado especificamente para sistemas FV e utiliza um chip especial de controlo inteligente. O display do equipamento apresenta o estado dos parâmetros do sistema a funcionar.

Tabela 5.9 – Especificações técnicas do controlador de carga para o sistema FV (Hefei Sunway Power Co., Ltd, 2014).

Especificação	Valor
Modelo	Sunway Power SSCP-384V-85A-TA
Potência máxima do sistema FV	32 600W
Corrente máxima do sistema FV	85 A
Tensão das baterias	390 V
Peso	13 Kg
Dimensão	540 mm x 505 mm x 150mm
Preço	424.20 €
Ciclo de vida	15 anos

Figura 5.13 – Controlador de carga Sunway Power SSCP-384V-85A (Hefei Sunway Power Co., Ltd, 2014).

5.2.4.2 Controlador de carga do sistema eólico

À semelhança do sistema FV, também se propõe a instalação de um controlador de carga em cada uma das turbinas eólicas, com os mesmos objectivos. As características do equipamento seleccionado (figura 5.14) encontram-se na tabela 5.10. Para além do tamanho reduzido e da utilidade do display, oferece protecção contra sobrecarga, sobretensão, subtensão e sobreaquecimento, entre outras. O controlador tem um funcionamento seguro e fiável, com elevada eficiência e ciclo de vida.

Tabela 5.10 – Especificações técnicas do controlador de carga para o sistema eólico (CAP Solar, 2013)

Especificação	Valor
Modelo	CAP SSWC-10-24
Potência da turbina eólica	1000W
Potência máxima da turbina eólica	1500 W
Corrente máxima da turbina eólica	60 A
Tensão das baterias	24 V
Peso	7 Kg
Dimensão	355 mm x 380 mm x 150 mm
Preço	274.90 €
Ciclo de vida	15 anos

Figura 5.14 – Controlador de carga CAP SSWC-10-24 (CAP Solar, 2013)

5.2.5 Inversor

Foi seleccionado um tipo de inversor adequado para os sistemas FV, eólico e de armazenamento. Este inversor fornece energia eléctrica para o barramento AC do navio em estudo, a uma tensão de 400 V. Teve que se ter em consideração o valor da potência máxima (sem perdas) de cada subsistema, de forma a seleccionar um inversor com essa capacidade, evitando posteriores danificações. Assim:

- Potência máxima do sistema FV = 29 835 W
- Potência máxima do sistema eólico = 2 x 1142 W = 2284 W
- Potência máxima de entrada no inversor = 29 835 W + 2284 W = 32 119 W

A tensão de entrada no inversor é 390 V. A tabela 5.11 apresenta as características do inversor (figura 5.15) selecionado. Este modelo encontra-se dividido em duas entradas, no entanto, os valores apresentados referem-se à capacidade total de potência e corrente. Este modelo específico é direccionado para sistemas isolados.

De forma a maximizar a energia produzida, optou-se por ligar dois inversores em paralelo, aumentando a corrente e a potência de entrada. No cálculo da potência nominal de saída AC aplica-se um valor de cos φ > 0.995.

Tabela 5.11 – Especificações técnicas do inversor (PVshop.eu, 2014)

Especificação	1 Inversor	2 Inversores em paralelo
Modelo	PVI-12.0-I-OUTD-400 (S)	PVI-12.0-I-OUTD-400 (S)
Tensão entrada DC	390 V	390 V
Corrente máxima DC	50 A (2 x 25 A)	100 A
Potência nominal entrada DC	12 300 W	24 600 W
Potência máxima entrada DC	13 700 W	27 400 W
Eficiência	97 %	97 %
Tensão saída AC	400 V	400 V
Corrente máxima AC trifásica	18 A	18 A
Potência nominal saída AC	12 000 W	24 000 W
Potência máxima saída AC	12 500 W	25 000 W
Frequência	57 - 63 Hz	57 - 63 Hz
Peso	45.8 Kg	91.6 Kg
Dimensão	716 mm x 645 mm x 222 mm	1430 mm x 645 mm x 222 mm
Preço	2044.85 €	4089.10 €
Ciclo de vida	15 anos	15 anos

Figura 5.15 – Inversor PVI-12.0-I-OUTD-400 (S) (PVshop.eu, 2014)

O local seleccionado para instalação dos inversores é o espaço da casa das máquinas do “LISBONENSE”, cuja planta (figura D.1) se encontra no Anexo D.

5.2.6 Sistema de controlo e monitorização

O dispositivo com o sistema de monitorização permite controlar e monitorizar os subsistemas do sistema híbrido – FV, eólico, *diesel* e baterias – em tempo real, incluindo diversos parâmetros que permitem rentabilizar o sistema e diminuir as emissões de CO_2.

O equipamento seleccionado é o *Sunny Home Manager* (figura 5.16) que, sendo uma ferramenta de monitorização e gestão inteligente do sistema de energia, fornece informações remotas, através do *SMA Sunny Portal* na internet. Para além de uma visão geral de todos os fluxos de energia que se encontrem a decorrer no sistema, o dispositivo apresenta recomendações de gestão de energia e pode controlar as cargas eléctricas automaticamente, optimizando todo o sistema. O dispositivo regista o padrão normal dos consumos e relaciona esta informação com uma previsão meteorológica. Deste modo, o *Sunny Home Manager* permite que seja consumida uma maior proporção de energia produzida pelas fontes de energias renováveis, com elevada eficiência energética.

O custo do Sunny Home Manager com monitorização do sistema sem fios através de Bluetooth é 375.20 € (Wind & Sun Ltd, 2013).

Figura 5.16 – Sistema de controlo e monitorização *Sunny Home Manager* (SMA Solar Technology AG, 2013)

O operador pode utilizar o *display* (figura 5.17) para receber informações em directo sobre a gestão de energia. Os dados são actualizados a cada 10 segundos, o que permite melhorar o rendimento do sistema.

As principais características do equipamento são:

- Transparência para todos os fluxos de energia;
- Monitorização gratuita do sistema assegura o rendimento ideal;
- Fácil instalação;
- Notificação imediata através de e-mail no caso de ocorrer uma falha;
- Os valores de energia produzida e dos consumos eléctricos são visíveis em directo no *display*;
- Indicação do carregamento e descarregamento das baterias, permitindo a utilização das mesmas no momento ideal;
- Utilização da previsão meteorológica para calcular o potencial de energia eólica e solar.
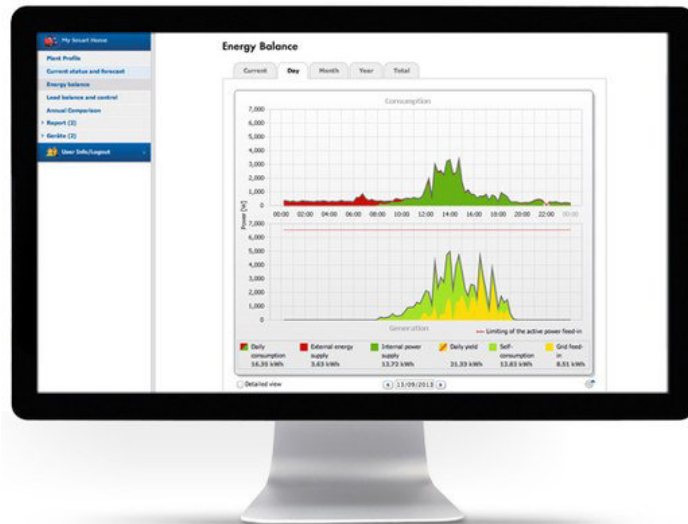
Figura 5.17 – Display do *Sunny Home Manager* (SMA Solar Technology AG, 2013)

O *Sunny Home Manager* assegura que a energia produzida pelas diferentes fontes é utilizada de forma optimizada, alimentando as aplicações eléctricas e armazenando o excesso nas baterias. Deste modo, os operadores podem ter o controlo total do sistema (http://www.windandsun.co.uk).

Circuito de comando a inserir no *Sunny Home Manager:*

Para que o gerador a *diesel* do navio comece a produzir energia quando o sistema FV, o sistema eólico e as baterias já não tenham capacidade para satisfazer as aplicações eléctricas no momento, é necessário programar o *Sunny Home Manager* nesse sentido. Para tal, a figura 5.18 apresenta um circuito de comando elaborado e proposto no presente trabalho, representando uma possibilidade de programação a inserir no dispositivo de controlo e monitorização.
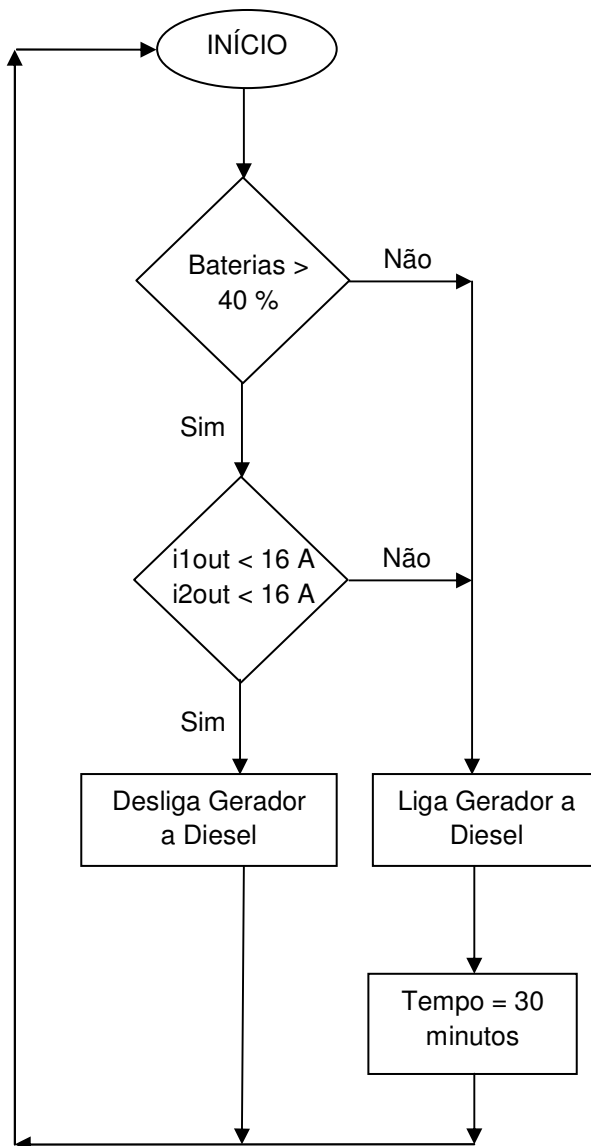
Figura 5.18 – Circuito de comando

Através das medições das cargas/descargas das baterias e da intensidade de corrente à saída dos inversores, o autómato liga ou desliga o gerador a *diesel*. Os valores i1out e i2out correspondem à intensidade de corrente de saída dos dois inversores, respectivamente, com uma margem de segurança de 11.1 %. Resumindo sucintamente o circuito:

a) Se as baterias tiverem carga superior a 40 % e i1out e i2out forem inferiores a 16 A, respectivamente, o gerador a *diesel* mantém-se desligado pois não é necessário aumentar a produção de energia;

b) Se as baterias tiverem carga superior a 40 % mas i1out ou i2out forem superiores a 16 A, respectivamente, o gerador a *diesel* é ligado pois é necessário aumentar a produção de energia;

c) Se as baterias tiverem carga inferior a 40 %, o gerador a *diesel* é ligado pois é necessário aumentar a produção de energia;

d) O gerador a *diesel* demora 30 minutos a ficar operacional, antes de iniciar a produção de energia para as aplicações eléctricas, de forma a poder estabilizar o variador de velocidade.

Este circuito é apenas um exemplo sugerido, podendo sofrer várias alterações conforme as opções do operador como, por exemplo, ao nível da carga mínima das baterias ou do tempo mínimo para estabilizar o gerador a *diesel*.

5.3 Projecto introduzido no *HOMER*

O diagrama da figura 5.19 apresenta o resultado do projecto do sistema híbrido em estudo, introduzido no *software HOMER*.
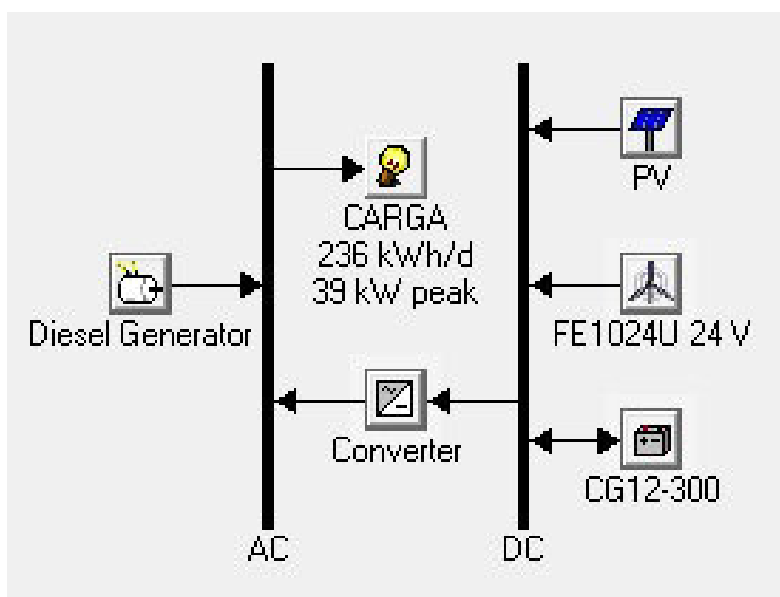
Figura 5.19 – Configuração do sistema de energia híbrido através do HOMER

O projecto foi introduzido no *software* através dos dados apresentados no anexo B.

5.3.1 Resultados do *HOMER* a nível energético e ambiental
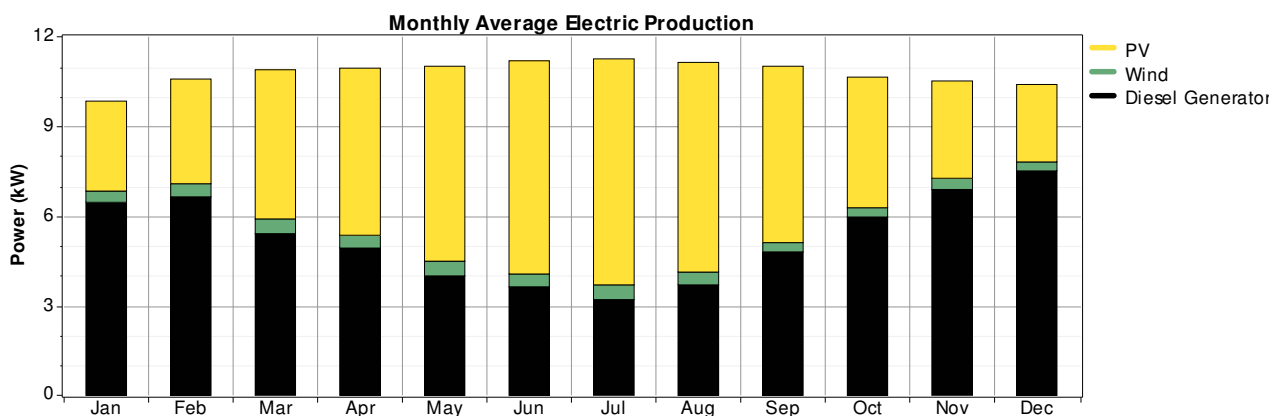
Figura 5.20 – Produção de energia eléctrica mensal por fontes de energia (HOMER)

A figura 5.20 apresenta a quantidade e a proporção de energia eléctrica produzida em cada mês de 2013, entre as diferentes fontes – módulos FV, turbinas eólicas e gerador a *diesel*. A tabela 5.12 apresenta os valores anuais, dos quais se destaca a elevada fração de energias renováveis que foi utilizada, assim como o reduzido valor de excesso de electricidade produzido.

Tabela 5.12 – Energia eléctrica anual (HOMER)

Fonte de energia	Produção kWh/ano	Percentagem (%)	
FV	45 023	47	Fração de energias renováveis utilizada = 51 %
Eólica	3 563	4	
Gerador a *diesel*	45 991	49	
Total	94 577	100	
	Consumo kWh/ano	Percentagem (%)	
Carga eléctrica AC	86.144	100	
	Quantidade kWh/ano	Percentagem (%)	
Excesso electricidade	1.280	0.001	
Carga eléctrica não satisfeita	0	0	
Insuficiência de capacidade	0	0	

As figuras 5.21. 5.22 e 5.23 apresentam a produção de energia proveniente das diferentes fontes, respectivamente, do sistema FV, do sistema eólico e do gerador a *diesel*, ao longo do dia; onde se pode observar a distribuição horária, consoante o mês. Na tabela 5.13 consta os outputs mínimo e máximo registados ao longo de 2013, assim como as horas de produção de cada fonte energética.
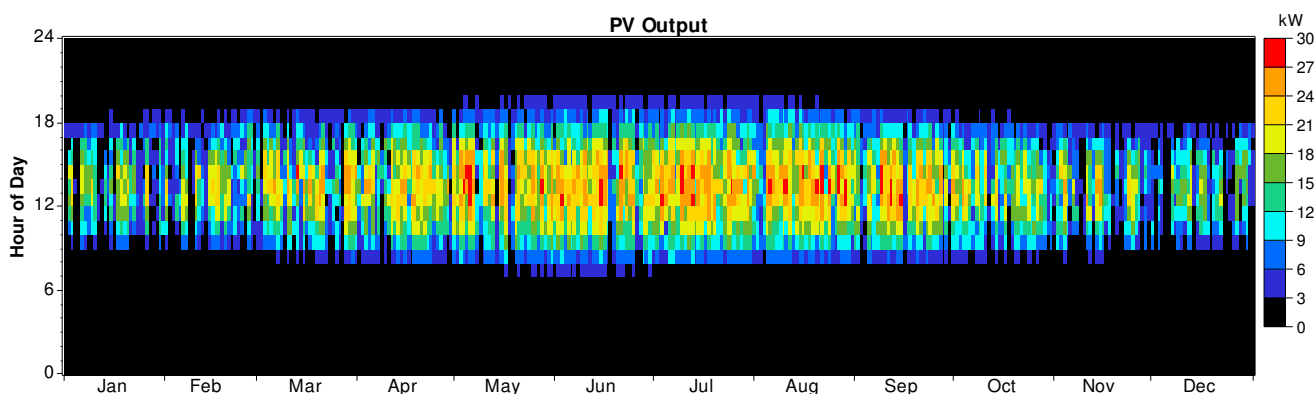
Figura 5.21 – Produção de energia eléctrica mensal pelos módulos FV (HOMER)
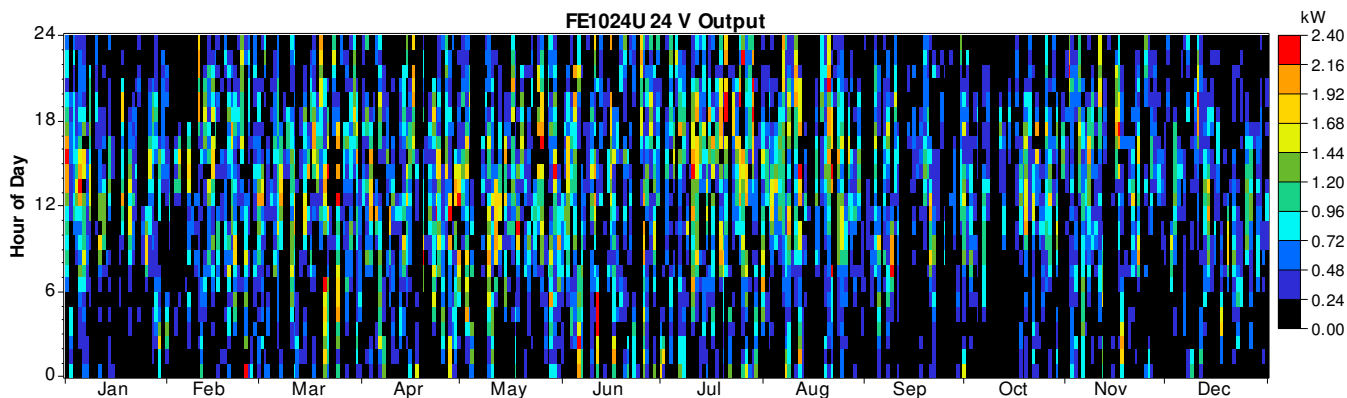
Figura 5.22 – Produção de energia eléctrica mensal pelas turbinas eólicas (HOMER)
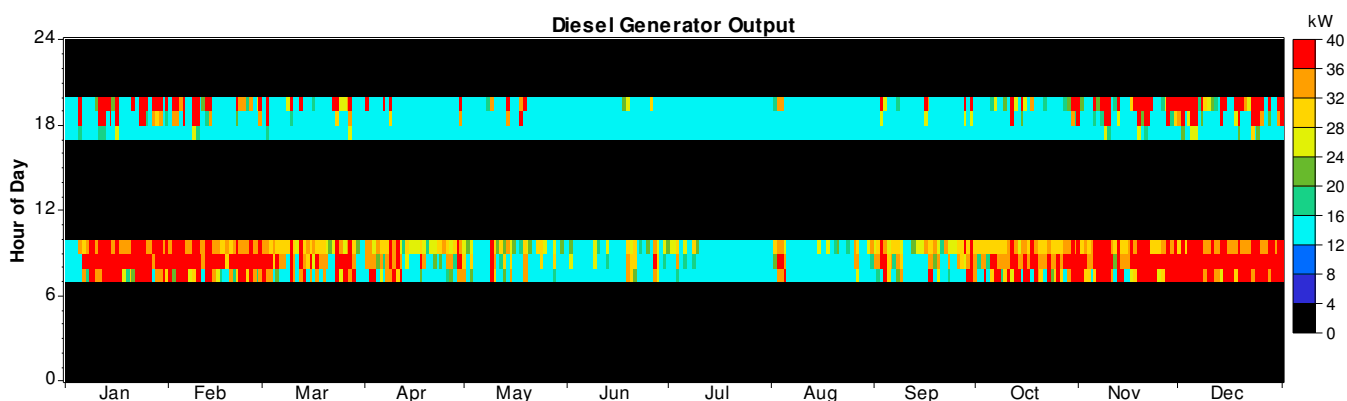
Figura 5.23 – Produção de energia eléctrica mensal pelo gerador a diesel (HOMER)

Tabela 5.13 – Energia eléctrica das diferentes fontes de energia (HOMER)

Parâmetro	Produção FV	Produção eólica	Produção do gerador a *diesel*
Output máximo	29.4 kW	2.28 kW	39.3 kW
Output mínimo	0 kW	0 kW	7.3 kW
Tempo de operação	4 380 horas/ano	8 685 horas/ano	2 190 horas/ano

O gráfico da figura 5.24 revela a energia elétrica que, proveniente das fontes FV e eólica, é convertida em DC para alimentar as aplicações eléctricas. Da tabela 5.14 salientam-se as perdas inerentes a esta conversão.
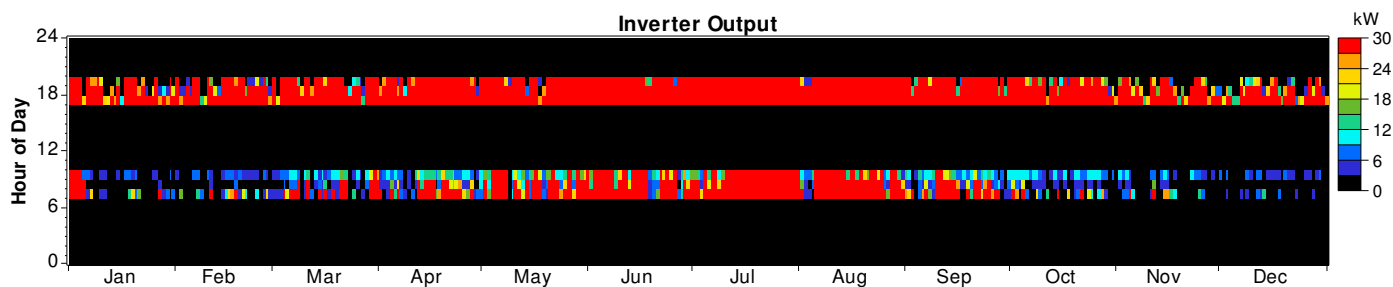
Figura 5.24 – Conversão de energia eléctrica mensal pelo inversor (HOMER)

Tabela 5.14 – Energia eléctrica do inversor (HOMER)

Parâmetro	Produção
Output máximo	32 kW
Energia de entrada	41 391 kWh/ano
Energia de saída	40 150 kWh/ano
Perdas	1242 kWh/ano

Com base na energia produzida, e nas diferentes proporções de fontes utilizadas, o *HOMER* calcula as percentagens dos diferentes constituintes das emissões atmosféricas do navio.
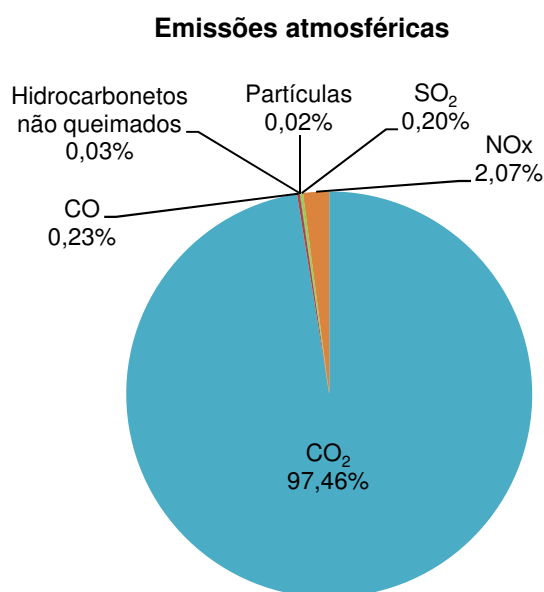
Figura 5.25 – Proporção dos elementos poluentes nas emissões atmosféricas (HOMER)

5.3.2 Resultados do *HOMER* a nível económico

Após converter-se os valores de dólares para euros, a tabela 5.15 apresenta o resumo dos custos do sistema híbrido inserido no *HOMER*.

Tabela 5.15 – Custo da energia das diferentes fontes (HOMER)

Parâmetro	Custo energético (€/kWh)
Módulos FV	0.040
Turbinas eólicas	0.051
Gerador a diesel	0.104
Baterias	0
	Custo do sistema
Capital inicial (investimento)	31 589.56 €
Custo de operação	407.23 €/ano
Custo líquido actualizado total	127 330.12 €
Custo energético	0.118 €/kWh

O gráfico da figura 5.26 apresenta o custo líquido actualizado de cada um dos componentes principais do sistema híbrido, incluindo os respectivos investimentos, as despesas de exploração e os recursos energéticos.
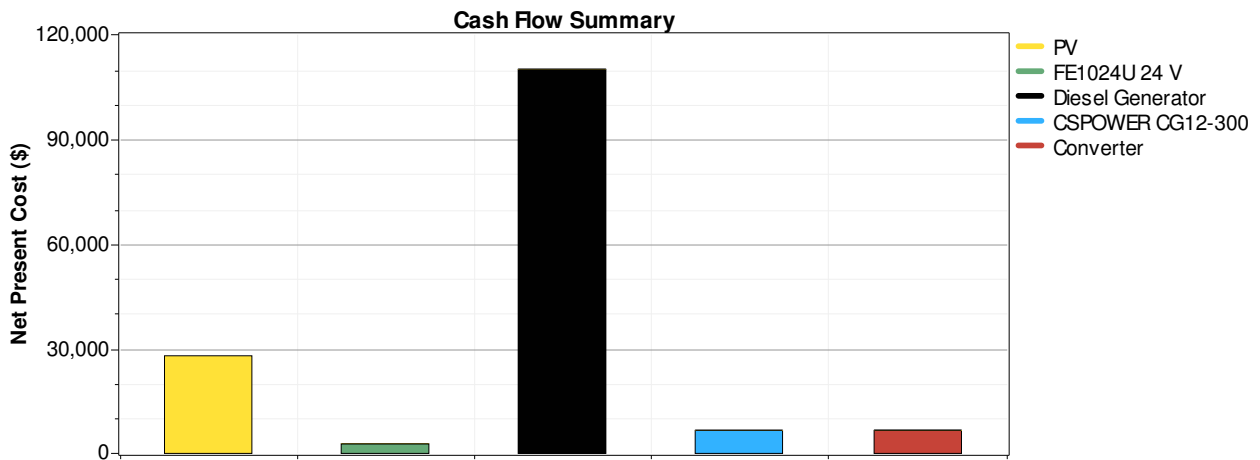
Figura 5.26 – Custo líquido actualizado de cada componente (HOMER)

As figuras 5.27 e 5.28 apresentam o *Cash-Flow* dos diferentes fluxos monetários e dos diferentes componentes, respectivamente. O "*capital*" inclui os investimentos iniciais, enquanto o "*replacement*" é a substituição de componentes, ou seja, inclui também investimentos mas em período diferente (ao 15º ano) do ciclo de vida do sistema híbrido. O "*salvage*" consiste no valor que determinados componentes têm no final do ciclo de vida. "*Operating*" são os custos de operação e manutenção do sistema, enquanto o "*fuel*" é o custo dos combustíveis consumidos.
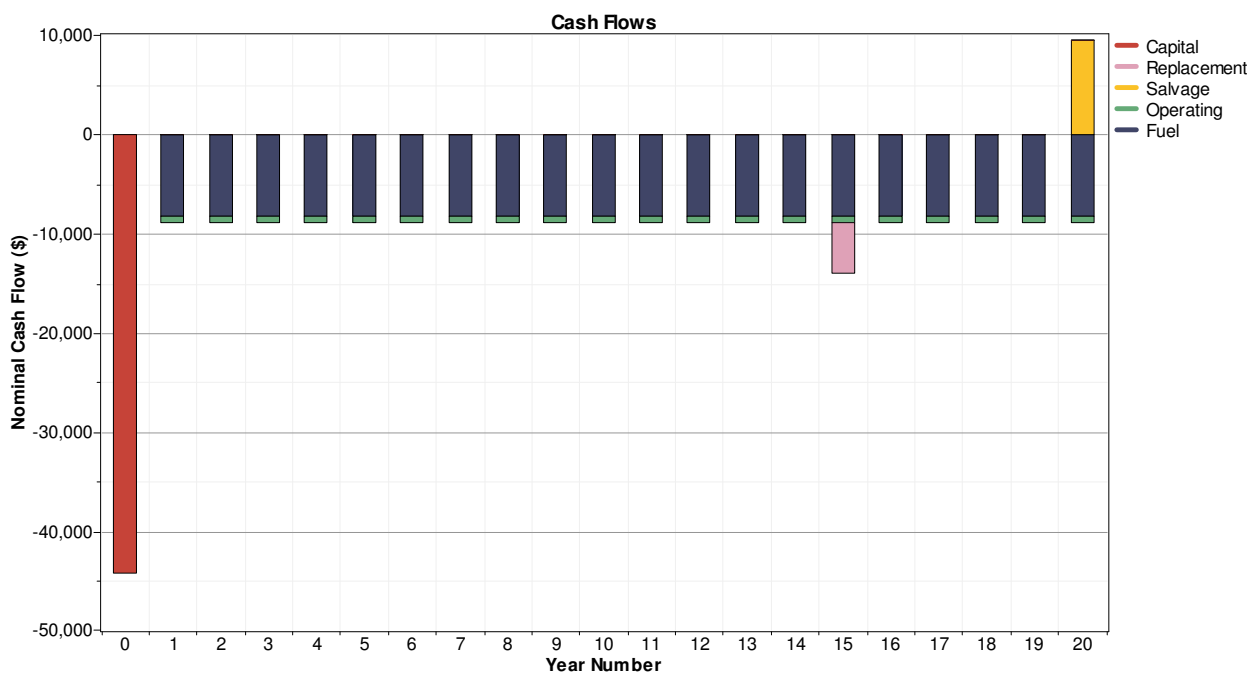
Figura 5.27 – *Cash Flow* do sistema ao longo da sua vida útil (HOMER)
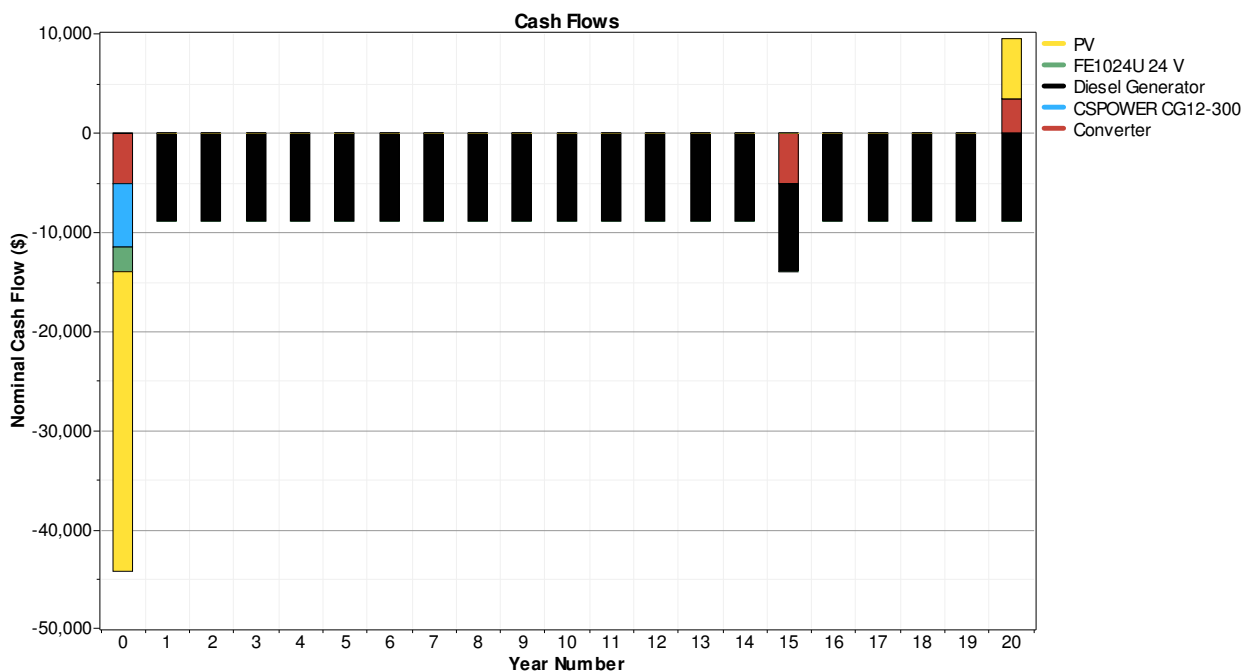
Figura 5.28 – *Cash Flow* dos componentes do sistema ao longo da sua vida útil (HOMER)

5.4 Emissões poluentes do sistema híbrido

Por falta de acesso à informação, foram desprezados os valores de energia eléctrica consumidos na produção, transporte e posterior desmantelamento dos componentes do sistema híbrido proposto. Consequentemente, as quantidades de emissões de GEE associadas a estes processos não estão incluídas no estudo.

Através da diferença entre a potência máxima do consumo de energia do navio e a potência máxima dos sistemas FV e eólico (32 119 W), calculou-se um novo consumo de *diesel* pelo gerador na produção de energia eléctrica no navio, durante um ano, através da tabela 5.16.

Tabela 5.16 – Cálculo do novo consumo de *diesel* anual do gerador

Parâmetro	Valor
Potência total	39 400 W – 32 119 W = 7 281 W
Horas funcionamento equipamentos	1446 horas/ano
Energia eléctrica	10 528 326 Wh
Energia térmica	37 901.97 MJ
PCI *diesel* (Supple, D., 2006)	42.8 MJ/Kg
Massa do *diesel*	885.56 Kg
Densidade do *diesel* (Petrobras, 2014)	0.852 Kg/L
Quantidade *diesel*	1039.39 L
Novo consumo horário médio	0.72 L/h

Calculou-se os novos EEDI e EEOI do "LISBONENSE", após implementação do sistema híbrido FV/eólico/diesel, de modo a poder aferir a alteração da eficiência energética do navio.

A tabela 5.17 apresenta os valores a incluir na fórmula de cálculo do EEDI, enquanto a tabela 5.18 apresenta os valores a incluir na fórmula de cálculo do EEOI.

Tabela 5.17 – Parâmetros para o cálculo do novo EEDI

Parâmetro	Valor	
$C_{FME} = C_{FAE}$	3.206 g CO_2/g *diesel,* tendo como base um teor de carbono de 0.875	
V_{ref}	11 nós (nm/h)	
Capacidade	150 t	
Peso Bruto	630 – 440 = 190 t	
P	P_{ME} = 0.75 * 634 = 475.5	P_{AE} = 65 kW
P_{PTI}	634 * 0.75 / 0.7 = 679.29 kW	
P_{eff}	0	
P_{AEeff}	32.119 kW	
SFC_{ME}	205.3 g/kWh	
SFC_{AE}	211.4 g/kWh	
Fj	1 (por não operar no gelo)	
Fw	1 (no local de operação do "LISBONENSE", considera-se que o estado do mar é calmo).	
Feff	1	
Fi	1 (por não operar no gelo)	
Fc	1	

Aplicando a fórmula:

$$\frac{\left(\prod_{j=1}^{M} fj\right)\left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)}\right) + \left(P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}\right) + \left(\left(\prod_{j=1}^{M} fj \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(I)}\right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE}\right) - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(I)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}\right)}{fi \cdot fc \cdot capacidade \cdot V_{Ref} \cdot fw}$$

= 937.72 g/ t. nm

Tabela 5.18 – Parâmetros para o cálculo do novo EEOI

Parâmetro	Valor
i	20 viagens em dia útil
j	*diesel*
FC	0.0389 t por viagem
Cf	3.206 t CO_2/t *diesel,* tendo como base um teor de carbono de 0.875.
$m_{carga\ em\ 10\ viagens}$	360 passageiros ou 29 viaturas
$m_{carga\ em\ 10\ viagens}$	180 passageiros ou 15 viaturas
Di	0.96 milhas náuticas

Aplicando a fórmula:

$$EEOI = \frac{\sum_i \sum_j (FC_{ji} \times CF_j)}{\sum_i (m_{carga,i} \times D_i)}$$ = 0.534 x 10^{-3} t CO_2/passageiros. milhas náuticas ou

= 6.486 x 10^{-3} t CO_2/viaturas. milhas náuticas

Estes valores só terão utilidade se forem calculados frequentemente como, por exemplo, todos os dias de utilização do navio; de forma a ser efectuada uma monitorização das emissões de CO_2 emitidas pelo navio durante a sua operação.

5.5 Análise económica do projecto do sistema híbrido

Para efeitos do presente estudo assume-se uma taxa de actualização (*i*) de 5 % e um ciclo de vida do projecto (*n*) de 20 anos.

O custo do investimento do gerador a *diesel* não entra nos cálculos pois a proposta apresentada consiste na implementação de um sistema híbrido FV/eólico/*diesel* no "LISBONENSE", em que é aproveitado o gerador a *diesel* lá existente. Contudo, a sua manutenção tem que ser considerada.

A tabela 5.19 contém o Plano de investimentos, enquanto a tabela 5.20 apresenta o Plano de exploração do projecto. Considerou-se os seguintes cálculos:

- Investimentos
  - Módulos FV = Nº de módulos FV x Custo módulo FV
  - Turbinas eólicas = Nº de turbinas eólicas x Custo turbina eólicas
  - Baterias = Nº de baterias x Custo bateria
  - Inversor = Nº de inversores x Custo inversor
  - Cabo eléctrico = Nº de metros x Custo cabo eléctrico
- Poupança de combustível anual
  - 3.9 L/h – 0.72 L/h = 3.18 L/h
  - 3.18 L/h x 1446h = 4598.28 L
  - 4598.28 L x 1.384 €/L = 6364.02 €
- *Cash-Flow* de exploração = Receitas – Custos de exploração

Tabela 5.19 – Plano de investimentos do projecto

Descrição	Anos	
	0	15
Módulos FV	117 x 205.13 € = 24 000 €	
Turbinas eólicas	2 x 1255 € = 2510 €	
Controlador de carga FV	424.20 €	424.20 €
Controlador de carga eólico	2 x 274.90 € = 549.80 €	549.80 €
Baterias	33 x 151 € = 4983 €	
Inversor	2 x 2044.85 € = 4089.10 €	4089.10 €
Sistema de monitorização	375.20 €	
Cabo elétrico	30 x 0.95 € = 28.50 €	
Total dos custos de investimento (I)	36 959.80 €	5063.10 €
	42 022.90 €	

Tabela 5.20 – Plano de exploração e manutenção do projecto

Anos	Receitas	Custos de exploração		*Cash-Flow* de exploração (R-C) (€)
	Poupança combustível (€)	Manutenção das turbinas eólicas (€)	Manutenção do gerador (€)	
1	6364.02	20	365	5979.02
2	6364.02	20	365	5979.02
3	6364.02	20	365	5979.02
4	6364.02	20	365	5979.02
5	6364.02	20	365	5979.02
6	6364.02	20	365	5979.02
7	6364.02	20	365	5979.02
8	6364.02	20	365	5979.02
9	6364.02	20	365	5979.02
10	6364.02	20	365	5979.02
11	6364.02	20	365	5979.02
12	6364.02	20	365	5979.02
13	6364.02	20	365	5979.02
14	6364.02	20	365	5979.02
15	6364.02	20	365	5979.02
16	6364.02	20	365	5979.02
17	6364.02	20	365	5979.02
18	6364.02	20	365	5979.02
19	6364.02	20	365	5979.02
20	6364.02	20	365	5979.02

Com base nos valores apresentados nas duas tabelas anteriores, calculou-se o Valor Actualizado Líquido para o período de 20 anos:

- No anexo C, a tabela C.1 contém os Valores Actualizados Líquidos do *Cash-Flow* total (descontado e acumulado), dos investimentos e da exploração (receitas menos despesas) para cada ano do projecto. O gráfico da figura 5.29 foi elaborado com base nestes valores.
  - VAL do *Cash-Flow* total = $\sum_{t=0}^{n} \frac{\text{Rt-Ct-It}}{(1+i)^t}$ = 29 230.61 €
  - VAL do investimento em 20 anos = 15 837.99 €
  - VAL da exploração em 20 anos = 45 068.60 €

A Taxa Interna de Rentabilidade não foi calculada porque no presente projecto supõe-se que a taxa de juro é conhecida e só existe uma proposta, isto é, não existem várias alternativas de projecto com diferentes investimentos ou diferentes períodos de vida útil.

Calculou-se o Período de Recuperação de Capital:

- Como o VAL acumulado ano a ano passa do negativo directamente para o positivo (tabela C.1), recorreu-se a uma interpolação entre esses dois valores, e os respectivos períodos de tempo.
- $\sum_{t=0}^{t} \frac{\text{It}}{(1+i)^t} = \sum_{t=0}^{t} \frac{\text{Rt-Ct}}{(1+i)^t}$ ⟺ t = 6 anos, 2 meses e 8 dias = PRC
- O mesmo valor pode ser obtido graficamente (ponto vermelho na figura 5.29)
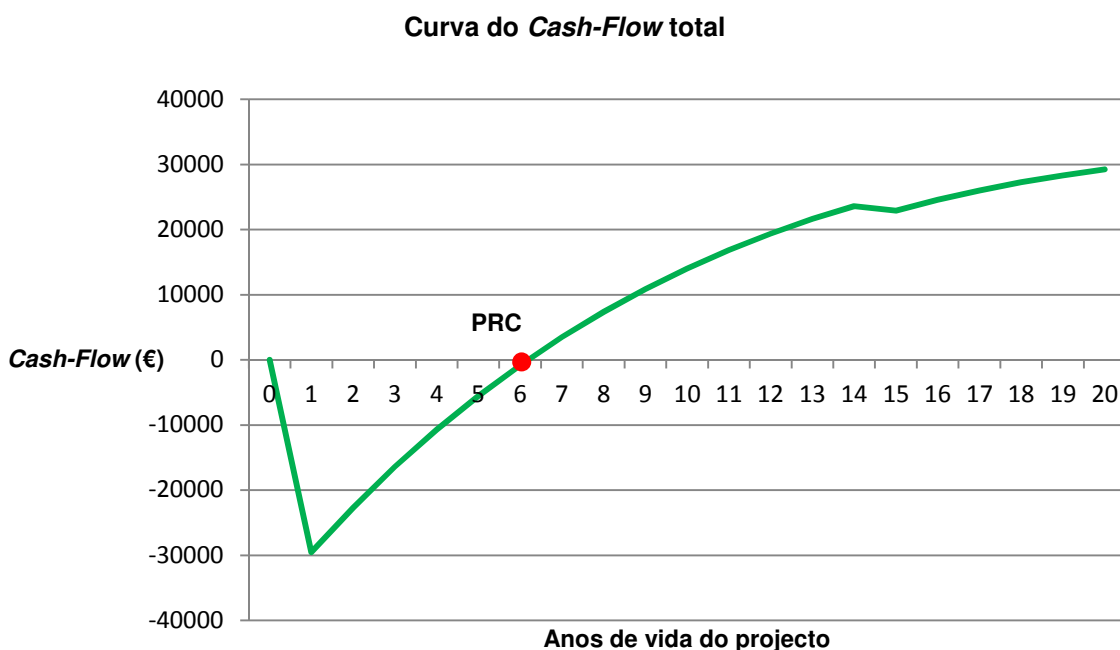
Figura 5.29 – Curva do *Cash-Flow* total (descontado e acumulado) do projecto em análise

O custo energético do sistema híbrido proposto é apresentado na tabela 5.21. Foi calculado com base no VAL do *Cash-Flow*, e o tempo de referência utilizado foi o número horas no ano de 2013 em que houve produção de energia – 1446 horas.

Tabela 5.21 – Custo energético do sistema híbrido

Sistema	Quantidade de energia produzida num ano (kWh)	Custo energético (€/kWh)
Total	56 972.40	0.513
FV	43 141.41	0.678
Eólico	3 302.66	8.851
Fracção renovável	46 444.07	0.629
Diesel	10 528.326	2.776

6.1 Diagrama final do sistema híbrido FV/eólico/*diesel*

A figura 6.1 apresenta o diagrama final do sistema híbrido FV/eólico/diesel em estudo. Para além dos componentes seleccionados, pode-se observar as tensões e tipos de corrente dos diferentes circuitos.
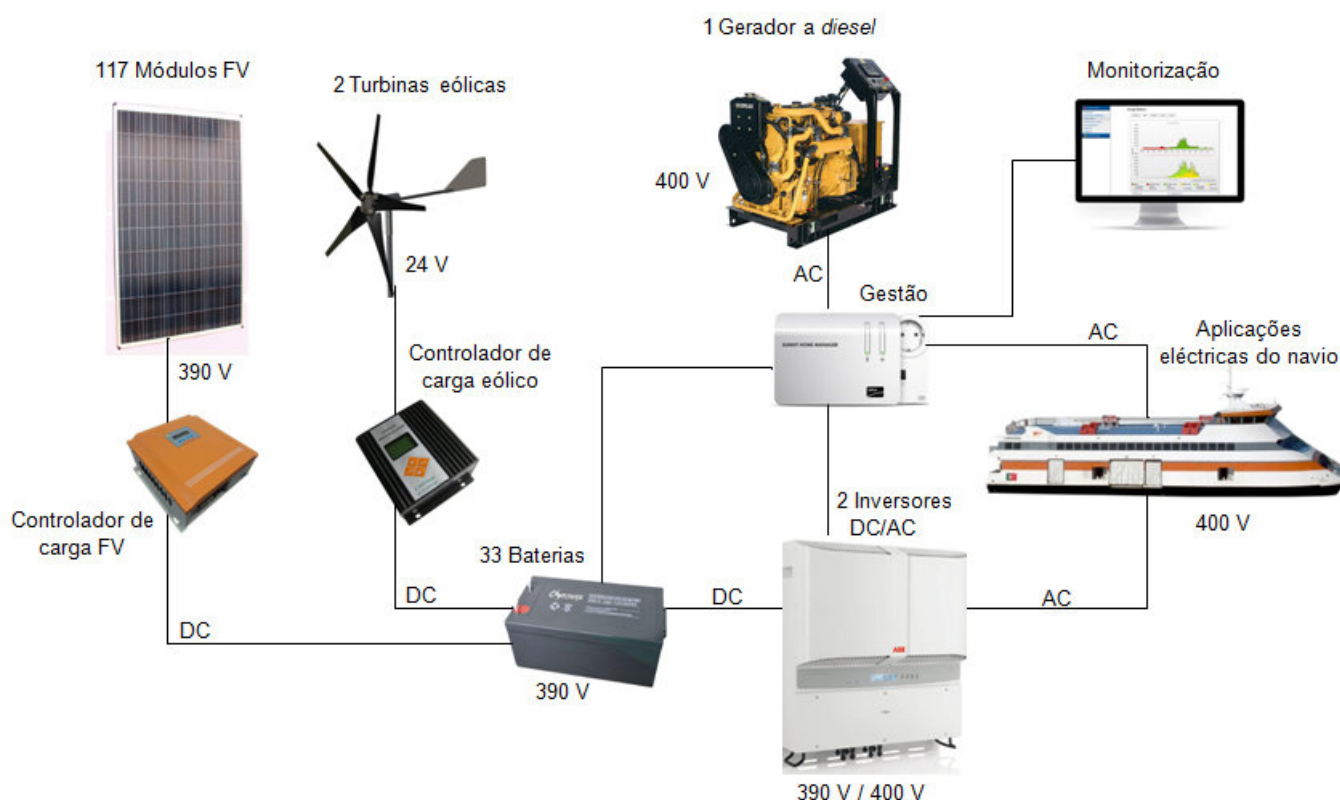
Figura 6.1 – Diagrama do sistema de energia híbrido FV/eólico/*diesel*

Esta configuração final é uma optimização do sistema híbrido, tendo em conta as necessidades eléctricas do navio; os recursos energéticos disponíveis, privilegiando os renováveis; e a relação custo-benefício de cada componente.

6.2 *HOMER*

Quanto à análise de produção de energia, constata-se que o sistema FV produz mais energia entre as 11 e as 17 horas e entre os meses de março e setembro, a nível anual; o que é justificável pelo facto da radiação solar ser mais intensa nesses períodos. Adicionalmente, o número de horas de pico de sol é mais elevado no verão. O sistema eólico produz energia de um modo quase uniforme, destacando-se apenas uma ligeira redução durante a noite. Esta produção é justificável pelo elevado potencial de vento em Portugal, ao longo de todo o ano. A nível de utilização do gerador e *diesel,* verifica-se que está sempre em funcionamento durante os períodos em que o navio se encontra a

navegar e a utilizar as respectivas aplicações eléctricas. Contudo, salienta-se uma redução entre março e setembro, devido ao aumento de produção de energias renováveis nesse período, principalmente de origem FV. Verifica-se que ao final do dia a produção também é menor, pois a energia renovável que foi produzida durante o período diurno cobre uma grande parte das necessidades energéticas, em paralelo com a energia armazenada nas baterias.

No caso do inversor, ao contrário do gerador a *diesel*, mas pelo mesmo motivo – aumento da disponibilidade dos recursos renováveis –,verifica-se uma maior utilização entre março e setembro e no período nocturno. O valor das perdas energéticas deste equipamento, cerca de 1242 kWh por ano, deve-se à transformação da corrente DC em AC e às diferenças de tensões.

Pode-se observar que, das emissões atmosféricas emitidas pelo navio, calculadas pelo *HOMER*, o componente que se destaca é o CO_2 com 97.46 %, seguido dos NOx com 2.07 %.

Quanto à análise económica do *HOMER*, destaca-se um custo energético global de 0.118 €/kWh. Se este custo for direccionado para uma fonte energética específica, o referente ao sistema a *diesel* é o mais caro, seguido do sistema eólico e por fim o sistema FV.

Verifica-se que o custo líquido actualizado do sistema a *diesel* é significativamente mais elevado que o dos restantes sistemas, pois o *software* inclui os custos do combustível consumido, algo que não pôde ser contornado, apesar da análise económica do projecto proposto nesta dissertação não incluir estes custos. O custo líquido actualizado mais reduzido corresponde ao sistema eólico devido ao facto de incluir apenas duas turbinas eólicas que exigem pouca manutenção e cujo recurso energético não tem custo.

Do *Cash-Flow* dos fluxos monetários, destaca-se um elevado investimento inicial e substituição de componentes no 15º ano de vida do projecto. O custo do combustível apresentado refere-se exclusivamente ao *diesel*, uma vez que os restantes recursos energéticos (vento e sol) não têm custo.

Já o *Cash-Flow* dos componentes sobressai no 1º ano de vida do projecto, referente aos componentes dos sistemas de energias renováveis, devido ao investimento inicial. No final de vida do projecto, constata-se que o *Cash-Flow* positivo refere-se ao inversor e ao sistema FV, o que significa que estes incluem os componentes com maior durabilidade física.

6.3 Redução das emissões poluentes

A tabela 6.1 apresenta a diferença do EEOI e do EEDI do navio, relativamente ao sistema híbrido e ao sistema apenas a *diesel*.

Tabela 6.1 – Comparação dos EEOI e EEDI

	EEOI passageiros	EEOI viaturas	EEDI
Sistema a diesel	0.571×10^{-3} t CO_2/passageiros. milhas náuticas	6.925×10^{-3} t CO_2/viaturas. milhas náuticas	964.10 g/ t. nm
Sistema híbrido	0.534×10^{-3} t CO_2/passageiros. milhas náuticas	6.486×10^{-3} t CO_2/viaturas. milhas náuticas	937.72 g/ t. nm
Redução CO_2	0.036×10^{-3} t CO_2/passageiros. milhas náuticas	0.439×10^{-3} t CO_2/viaturas. milhas náuticas	26.39 g/ t. nm
Redução percentual	6.34 %	6.34 %	2.74 %

Como se pode constatar, após implementação do sistema híbrido, existe diminuição de ambos os índices, no entanto, é pouco significativo. Esta proporção pode ser justificada pelo facto deste tipo de avaliação ter como alvo principal o transporte marítimo internacional, em que os navios têm maior tonelagem, transporte de carga e consumo de *diesel*, com uma emissão de CO_2 em quantidades muito superiores, logo, a redução seria mais notória.

Relativamente ao consumo diário de combustível *diesel,* a tabela 6.2 apresenta as diferenças entre o sistema convencional e o híbrido.

Tabela 6.2 – Comparação de consumos de *diesel* e emissões de CO_2

	Consumo anual de *diesel*	Consumo Horário
Sistema a diesel	5637.67 L	3.9 L/h
Sistema híbrido	1039.39 L	0.72 L/h
Redução	4598.28 L	3.18 L/h
Redução percentual	81.56 %	81.54 %
	Emissão anual de CO_2	**Emissão horária CO_2**
Sistema a diesel	15.173 t CO_2	10.498 Kg CO_2/h
Sistema híbrido	2.797 t CO_2	1.936 Kg CO_2/h
Redução	12.376 t CO_2	8.562 Kg CO_2/h
Redução percentual	81.56 %	81.56 %

Para efetuar os cálculos da tabela anterior, considerou-se os seguintes valores:

- Teor de C no diesel (CFR, 2007) = 2.778 Kg C/galão = 0.734 Kg C/L
- Teor de C em 5637.67 L de diesel = 4138.050 Kg C
- Teor de C em 1039.39 L de diesel = 762.912 Kg C
- Teor de C em 3.9 L/h de diesel = 2.863 Kg C/h
- Teor de C em 0.72 L/h de diesel = 0.528 Kg C/h
- M (C) = 12 g/mol; M (O_2) = 32 g/mol; M (CO_2) = 44 g/mol
- 12 Kg C → 44 Kg CO_2
- 4138.050 Kg C → 15172.85 Kg CO_2
- 762.912 Kg C → 2797.344 Kg CO_2

- 2.863 Kg C → 10.498 Kg CO_2
- 0.528 Kg C → 1.936 Kg CO_2

Verifica-se uma redução significativa (cerca de 82 %) no consumo de *diesel* e, consequentemente, na emissão de CO_2, do sistema híbrido em relação ao sistema convencional.

6.4 Aspectos económicos

A análise económica feita manualmente é significativamente diferente da que é apresentada pelo *HOMER*, devido ao facto deste *software* incluir os consumos do *diesel* nas despesas do novo projecto. No entanto, o projecto proposto neste trabalho foca a instalação do sistema híbrido num navio com um sistema a *diesel* já existente*,* em que os consumos deste combustível só podem ser tidos em conta a nível de redução. Assim, na análise económica, o custo do *diesel* consumido é desprezado porque esse consumo já é concretizado no sistema convencional; no entanto, a poupança de combustível derivada da implementação do projecto constitui as receitas.

Como o VAL é um valor positivo, o projecto é considerado rentável, justificando o respectivo investimento.

O PRC, correspondente a 6 anos, 2 meses e 8 dias, indica também que se trata de um projecto rentável, em que os investimentos e as despesas são recuperados através das receitas nesse instante. Faltando quase 14 anos para o fim do ciclo de vida do sistema híbrido, prevê-se que o saldo neste período seja sempre positivo.

Através da curva do *Cash-Flow* total, para além de se conseguir apurar o PRC, o VAL também pode ser extraído, sendo correspondente ao *Cash-Flow* total no fim do ciclo da vida do projecto, ou seja, no 20º ano.

O custo energético do sistema híbrido é 0.513 €/kWh; contudo, verifica-se que o custo energético do sistema eólico é muito elevado em relação aos restantes. Esta diferença deve-se ao facto do potencial energético ser inferior ao das outras fontes de energia pois, apesar do recurso utilizado (vento) não ter custos e ser muito disponível, está limitado a duas turbinas eólicas. Por outro lado, o custo energético do sistema FV é o mais reduzido, pois tem um potencial energético superior, para além da isenção de custos do recurso utilizado – o sol.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Actualmente, as questões ambientais não podem ser ignoradas, o que exige um desenvolvimento sustentável a nível global e local. As consequências da produção e consumo de energia de forma insustentável são nefastas para todos: fauna, flora e humanidade. Como tal, é necessário progredir e investir em novos projectos de utilização de sistemas de energias renováveis. A utilização, durante décadas, de combustíveis fósseis de baixo custo, abrandou a inovação, o engenho e o desenvolvimento tecnológico para aproveitamento dos recursos renováveis não fósseis. É fundamental acelerar este progresso.

O presente trabalho apresenta e propõe a implementação de um sistema híbrido FV/eólico/*diesel* num navio de transporte de passageiros e viaturas – o "LISBONENSE", propriedade da Transtejo – caracterizado do ponto de vista energético, ambiental e económico. O objectivo principal deste sistema é reduzir as emissões de GEE, nomeadamente o CO_2, provenientes do navio, através da utilização de energias renováveis – FV e eólica –, de forma sustentável e económica.

Um sistema FV tem uma determinada instabilidade associada, pois a quantidade de energia produzida não é constante ao longo do período pretendido, devido às oscilações na irradiância solar. Como tal, surge a importância de produzir energia a partir de outra fonte alternativa, como a eólica; em que o vento sopra, em Portugal, em qualquer período do dia, e em todos os meses do ano.

Para que o projecto do sistema híbrido pudesse ser ligeiramente mais rigoroso seria necessário recolher dados, ao longo de um ano, sobre a velocidade do vento e radiação solar no preciso local onde opera o navio, onde se pretende implementar o sistema híbrido; pois estes dados dependem exclusivamente do local de operação. No entanto, os dados fornecidos pelo IPMA e pelo IH referem-se a coordenadas muito próximas do local, e pode-se considerar que a informação sobre o vento é correcta e adequada.

Relativamente às turbinas eólicas, apesar de ter sido proposta a instalação de duas unidades no intuito de minimizar alterações da estabilidade e deslocamento, recomenda-se que seja feito um estudo detalhado sobre estas alterações. Considera-se que a altura das turbinas eólicas deveria ser um pouco mais reduzida, no entanto, as tecnologias disponíveis no mercado ainda não satisfazem todos os requisitos; ou seja, para se optar por uma turbina eólica com menores dimensões, a sua potência seria muito inferior. No estudo referente à estabilidade e deslocamento do navio também tem que ser considerado o peso dos módulos FV e das baterias.

Devido ao facto do sistema eléctrico do navio ser um sistema isolado, a navegar, a configuração e optimização do sistema híbrido foi mais complexa do que se estivesse ligado à rede eléctrica pública. Assim, é fundamental haver um bom sistema de monitorização e controlo dos vários componentes e dos respectivos fluxos energéticos.

Conclui-se que a implementação do sistema híbrido aumenta a autonomia do navio e, consequentemente, a sua segurança. No caso, por exemplo, de uma avaria do gerador a *diesel* durante a navegação, existem duas fontes adicionais a produzir energia, às quais se soma o conjunto de baterias. Adicionalmente, este aumento de segurança energética não permite que haja interrupção

na alimentação eléctrica dos equipamentos, assegurando a energia necessária no decorrer de eventuais picos ou cortes.

Na implementação deste projecto, pode-se optar por seleccionar um equipamento que contenha as funções de inversor, armazenamento e controlo; algo que está em ascensão no mercado.

Pode-se concluir que o *HOMER* é uma ferramenta que pode ser utilizada como apoio à optimização de sistemas híbridos FV/eólico/*diesel*, no entanto, é necessário analisar todas as variáveis e interpretar os resultados, de modo a perceber se os cálculos se adequam ao projecto. As principais vantagens registadas após utilização do *HOMER* são a possibilidade de comparação de projectos diferentes, obtida em célere simulação; a análise visual através de diferentes gráficos, consoante variáveis opcionais; a disponibilidade de diferentes fontes de energia; e a informação da base de dados relativa aos diferentes componentes de um sistema híbrido.

O *RETScreen*, por sua vez, demonstrou também ser útil na configuração de sistemas energéticos com fontes renováveis. Relativamente ao sistema FV, o contributo foi mais significativo do que o *HOMER*, pois forneceu dados de radiação solar no local correspondentes à inclinação e orientação seleccionadas para os módulos FV.

Concluiu-se que o sistema híbrido proposto é benéfico a nível ambiental, reduzindo as emissões atmosféricas poluentes comparativamente ao sistema convencional a *diesel*. Anualmente, *a* diminuição das emissões de CO_2 pode atingir os 81.56 %. Adicionalmente, apurou-se que ocorre uma redução de 6.34 % nas emissões de CO_2 por passageiros ou viaturas transportados durante o percurso do navio entre as margens do Rio Tejo.

A diminuição de 4598.28 L no consumo anual de *diesel,* após implementação do sistema híbrido, representa um contributo significativo para reduzir a dependência de Portugal em combustíveis fósseis provenientes do exterior.

Após o dimensionamento do sistema híbrido FV/eólico/*diesel*, no intuito de finalizar a sua optimização, foi realizada uma análise económica do respectivo projecto, da qual os resultados foram muito positivos. Através de diferentes critérios, conclui-se que o projecto é viável e rentável, tendo capacidade para recuperar os investimentos e despesas ao fim de 6 anos, 2 meses e 8 dias, num ciclo total de 20 anos. Esta recuperação é feita através da poupança de combustível (*diesel*) obtida com a implementação do novo sistema energético.

A implementação deste sistema híbrido no navio em estudo requer acções de formação direccionadas aos trabalhadores da Transtejo, com o intuito de transmitir conhecimentos sobre os subsistemas de energias renováveis e sobre os restantes componentes.

Com base numa visão de futuro sustentável e nestas conclusões, recomenda-se um incremento no desenvolvimento de sistemas híbridos energéticos e dos seus componentes, principalmente aplicável a navios. É necessário continuar a aprimorar as tecnologias das energias renováveis de forma a aumentar o aproveitamento dos recursos energéticos renováveis que o planeta oferece, tais como o sol e o vento. Apesar destes recursos terem maior potencial no mar e nos rios, devido à diminuição significativa de obstáculos em comparação com o meio urbano, este aproveitamento ainda é muito reduzido.

8. BIBLIOGRAFIA

A.P. Moller - Maersk Group's (2009). Health, Safety, Security and Environment Report 2008.

Abecassis, F. & Cabral, N. (2010). *Análise económica e financeira de projectos*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.

Agrawal, H., Malloy, Q., Welch, W., Miller, J., Cocker III, D. (2008). In-use gaseous and particulate matter emissions from a modernocean going container vessel. *Atmospheric Environment*, 42, 5504–5510.

Better Generation Group Ltd (2012). Better Generation. *FuturEnergy 1kW Wind Turbine*. Retirado de http://www.bettergeneration.co.uk/wind-turbine-reviews/futurenergy-1kw-wind-turbine.html em 09/09/2014.

BLG 16/INF.5 (Any other business. Impact of fuel quality regulation and speed reductions on shipping emissions: Implications for climate and air quality. Submitted by USA).

Bluebird Marine Systems Ltd (2014). LNG – Air Pollution Solution. *Bluebird Marine Systems Ltd.* Retirado de http://www.bluebird-electric.net/liquified_natural_gas_fuel_energy.htm em 05/08/2014.

CAP Solar (2013). CAP. *Wind controller 1kW & 2kW.* Retirado de http://www.cap-solar.com/product_show.asp?id=251 em 20/09/2014.

Carneiro, J. (2009). *Dimensionamento de Sistemas FV*. Guimarães: Universidade do Minho.

Carneiro, J. (2010). *Módulos fotovoltaicos – Características e associações*. Guimarães: Universidade do Minho.

Caterpillar (2007). *Marine generator Sets C4.4.* Caterpillar: EUA.

Code of Federal Regulations (2007). 40 CFR 600, 113-78 - *Fuel economy calculations*.

Corbett, J., Winebrake, J., Green, E., Kasibhatla, P., Eyring, V. & Lauer, A. (2007). Mortality from ship emissions: a global assessment. *Environmental Science & Technology*, 41(24), 8512–8518.

Chiozzotto, S. (2011). Cálculo da emissão de gases efeito estufa (GHG). *Sustentabilidade e Resultados*. Retirado de http://www.sustentabilidaderesultados.com.br/calculo-da-emissao-de-gases-efeito-estufa-ghg/ em 22/02/2013.

CSPower (2014). CSPower Battery Tech Co., LTD. *Solar GEL Battery*. Retirado de http://www.csagmbattery.com/products.asp?id=68 em 05/09/2014.

Douro Azul (2013). Frota. *Grupo Douro Azul*. Retirado de http://www.douroazul.com/Default.aspx?ID=1108 em 08/07/2014.

Dufo-López, R., Bernal-Agustín, J., Yusta-Loyo, J., Domínguez-Navarro, J., Ramírez-Rosado, I., Lujano, J. & Aso, I. (2011). Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV–wind–diesel systems with batteries storage. *Applied Energy,* 88, 4033–4041.

Ekren, O., Ekren, B. & Ozerdem, B. (2009) Break-even analysis and size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage – A case study. *Applied Energy*, 86 (7-8), 1043-1054.

European Environment Agency (2013). EEA Technical report nº 4/2013: The impact of international shipping on European air quality and climate forcing.

Eyring, V., Isaksen, I., Berntsen, T., Collins, W., Corbett, J., Endresen, O., Grainger, R., Moldanova, J., Schlager, H. & Stevenson, D. (2010). Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping. *Atmospheric Environment*, 44, 4735–4771.

Ferreira, A (2011). *Sistema de produção de energia eólica*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Fogaça, J. (2012). Conferência Rio+20 e a Emissão de Gases-estufa. *Brasil Escola*. Retirado de http://www.brasilescola.com/quimica/conferencia-rio20-emissao-gases-estufa.htm em 22/02/2013.

Fridell, E., Steen, E. & Peterson, K. (2008). Primary particles in ship emissions. *Atmospheric Environment*, 42(6), 1160-1168.

Fuel-prices-europe.info (2014). Current fuel prices, petrol prices, diesel prices, LPG prices in Europe on Tuesday, October 07, 2014. Retirado de http://www.fuel-prices-europe.info em 07/10/2014.

Futurenergy (2006). Futurenergy. *AirForce - 1kW Upwind Turbine*. Retirado de http://www.futurenergy.co.uk/turbine.html em 20/08/2014.

Hefei Sunway Power Co., Ltd (2014). Sunway Power. *PV System Controller*. Retirado de http://www.sunway-power.com/ProductShow.asp?id=73&pid=242 em 20/09/2014.

IMO (2012). EEDI – Rational, safe and effective. International Maritime Organization. Retirado de http://www.imo.org/MediaCentre/HotTopics/GHG/Pages/EEDI.aspx em 06/08/2014.

IMO News Magazine. Issue 3/2007. p. 98.

IMO News Magazine. Issue 1/2008. p. 6.

IMO News Magazine. Issue 4/2008. p. 6.

IMO News Magazine. Issue 3/2009. pp. 4-5 & pp. 21- 28.

IMO News Magazine. Issue 1/2012. p. 9.

IMO News Magazine. Issue 1/2012. p. 12-14.

IMO. 2009. Second IMO GHG Study 2009 – doc. MEPC59/INF.10. London: International Maritime Organization (IMO).

Instituto Hidrográfico (2014). Modelação de valores horários de velocidade e direção do vento, no período de 01 de janeiro de 2013 a 31 de dezembro de 2013, na posição geográfica de Latitude 38.6975 N e Longitude 9.1444 W.

Instituto Português do Mar e da Atmosfera (2014). Valores médios horários de velocidade do vento e rumo do vento, observados na estação meteorológica de Lisboa/Tapada da Ajuda, no período de 01 de Janeiro de 2013 a 31 de Dezembro de 2013.

Lai, K., Lun. V., Wong, C. & Cheng, T. (2011). Green shipping practices in the shipping industry: Conceptualization, adoption, and implications. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(6), 631-638.

Lee, K., Lee, D., Baek, N., Kwon, H. & Lee, C. (2012) Preliminary determination of optimal size for renewable energy resources in buildings using RETScreen. *Energy*, 47 (1), 83–96.

Lee, K., Shin, D., Yoo, D., Choi, H. & Kim, H. (2013). Hybrid photovoltaic/diesel green ship operating in standalone and grid-connected mode - Experimental investigation. *Energy*, 49, 475-483.

Lindstad, H., Asbjørnslett, B. & Strømman, A. (2011). Reductions in greenhouse gas emissions and cost by shipping at lower speeds. *Energy Policy*, 39(6), 3456-3464.

Liu, S., Papanikolaou, A. & Zaraphonitis, G. (2011). Prediction of added resistance of ships in waves. *Ocean Engineering*, 38, 641–650.

Macedo, P. (2011). Transportes XXI. *Lisbonense*. Retirado de http://www.transportes-xxi.net/fotografia/foto/8271 em 21/08/2014.

Magalhães, L. (2014). Lisboa e-nova. *Carta do Potencial Solar do Concelho de Lisboa*. Retirado do http://lisboaenova.org/cartasolarlisboa em 08/07/2014.

Maleki, A. & Askarzadeh, A. (2014). Optimal sizing of a PV/wind/diesel system with battery storage for electrification to an off-grid remote region: A case study of Rafsanjan, Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7, 147-153.

Mandatory measures adopted by Parties to MARPOL Annex VI represented in the MEPC of IMO. Briefing 42/2011, 15 July 2011.

MEPC 59/6/5 (Interpretations of and amendments to Marpol and related instruments. Proposal to Designate an Emission Control Area for Nitrogen Oxides, Sulphur Oxides and Particulate Matter. Submitted by the United States and Canada).

MEPC.1/Circ.681 (Interim guidelines on the method of calculation of the energy efficiency design index for new ships).

MEPC.1/Circ.682 (Interim guidelines for voluntary verification of the energy efficiency design index).

MEPC.1/Circ.683 (Guidance for the development of a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)).

MEPC.1/Circ.684 (Guidelines for voluntary use of voluntary use of the Ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI)).

MEPC.1/Circ.743 (Information on an approved method under Marpol Annex VI. Communication received from the Administration of Germany).

MEPC.1/Circ.755 (Information on the United States Caribbean Sea emission control area under MARPOL Annex VI).

MEPC.1/Circ.764 (Information on an approved method under Marpol Annex VI. Communication received from the Administration of Denmark).

MEPC.1/Circ.799 (Application of regulation 4 of Marpol Annex VI. Communication received from the Administration of Malta).

MEPC.212 (63) (2012) Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships.

Mezzai, N., Rekioua, D., Rekioua, T., Mohammedi, A., Idjdarane, K. & Bacha, S. (2014). Modeling of hybrid photovoltaic/wind/fuel cells power system. *International Journal of Hydrogen Energy,* 39(27), 15158–15168.

Moldanová, J., Fridell, E., Popovicheva, O., Demirdjian, B., Tishkova, V., Faccinetto, A. & Focsa, C. (2009). Characterisation of particulate matter and gaseous emissions from a large ship diesel engine. *Atmospheric Environment*, 43(16), 2632-2641.

Molland, A., Turnock, S. & Hudson, D. (2011). *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power.* Cambridge University Press: Cambridge.

Morais, J. (2009) *Sistemas fotovoltaicos: da teoria à prática*. S. Domingos de Rana: Weidmüller.

Norstad, I., Fagerholt, K. & Laporte, G. (2011). Tramp ship routing and scheduling with speed optimization. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(5), 853-865.

Nema, P., Nema, R. & Rangnekar, S. (2009). A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2096–2103.

Open Renewables (2013). Open Renewables. *Open 2XX-PQ60*. Retirado de http://www.openrenewables.com/pt/products/open-2xx-pq60 em 22/08/2014.

Park, J., Katagi, T., Yamamoto, S. & Hashimoto, T. (2001). Operation control of photovoltaic/diesel hybrid generating system considering fluctuation of solar radiation. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 67, 535-542.

Petrobras (2014). Petrobras. Densidade e Poderes Caloríficos Superiores. Retirado de http://www.investidorpetrobras.com.br/pt/servicos/formulas-de-conversao/detalhe-formulas-de-conversao/densidade-e-poderes-calorificos-superiores.htm em 15/09/2014.

Portal Energia (2012). Portal Energia – Energias Renováveis. *Dimensionamento do controlador de carga para um sistema solar*. Retirado de http://www.portal-energia.com/dimensionamento-do-controlador-de-carga-para-um-sistema-solar em 30/08/2014.

Psaraftis, H. & Kontovas, C. (2013). Speed models for energy-efficient maritime transportation: A taxonomy and survey. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 26, 331-351.

PVshop.eu (2014) PVshop.eu PhotoVoltaic Solar Systems. *PV Solar Inverters (230V/400Vac).* Retirado de http://pvshop.eu/ABB-Power-One-Aurora-PVI-10.0-I-OUTD-S-400V-50Hz-3Phase-Isolated-10kW-PV-Solar-Inverter.html em 17/09/2014.

Quickbit (2014). Quickbit.co.uk Lighting & Electrical Suppliers*. 6mm Black PV Solar Cable*. Retirado de http://quickbit.co.uk/6mm-solar-cable em 30/09/2014.

Rehman, S., Alam, M., Meyer, J. & Al-Hadhrami, L. (2012). Feasibility study of a wind-pv-diesel hybrid power system for a village. *Renewable Energy*, 38, 258-268.

Revised MARPOL Annex VI – Regulation 12 Guidance Notes.

Saheb-Koussa, D., Haddadi, M. & Belhamel, M. (2009). Economic and technical study of a hybrid system (wind-photovoltaic-diesel) for rural electrification in Algeria. *Applied Energy*, 86 (7-8), 1024-1030.

Shao, W., Zhou, P. & Thong, S. (2012). Development of a novel forward dynamic programming method for weather routing. *Journal of Marine Science and Technology,* 17, 239-251.

SKF (2008). SKF Group. *Biodegradable grease*. Retirado de http://www.skf.com/group/products/lubrication-solutions/lubricants/biodegradable-grease/index.html em 20/09/2014.

SMA Solar Technology AG (2013). SMA. *Sunny Home Manager*. Retirado de http://www.sma.de/en/products/monitoring-control/sunny-home-manager.html em 23/09/2014.

Stackhouse, P. (2014). Surface meteorology and Solar Energy. *NASA Surface meteorology and Solar Energy: RETScreen Data.* Retirado de http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen em 15/07/2014.

Supple, D. (2006). MIT Energy Club. *Units & Conversions Fact Sheet.* Retirado de http://web.mit.edu/mit_energy em 15/09/2014.

TecnoVeritas (2011). Ship Energy Surveys - Improving fuel efficiency and environmental impact of your ship operations. Retirado de http://www.tecnoveritas.net/en/ship-energy-surveys.php em 08/03/2013.

TecnoVeritas (2012a). ENERLMUSION – *Fuel Emulsification System*. Retirado de http://www.tecnoveritas.net/en/enermulsion.php em 08/03/2013.

TecnoVeritas (2012b). SEEMP - *Ship Energy Efficiency Management Plan*. Retirado de http://www.tecnoveritas.net/en/ship-energy-efficiency.php em 08/03/2013.

TecnoVeritas (2013). VEEO - *Voyage analysis & in-service ship performance monitoring to reduce fuel cost*. Retirado de http://www.tecnoveritas.net/en/veeo.php em 08/03/2013.

Transtejo a). Livro de registo de consumos de combustível do “LISBONENSE”.

Transtejo b). Características do “LISBONENSE”.

Transtejo c). Fichas mestras equipamentos do “LISBONENSE”.

United States Department of the Navy (2010). *Department of the Navy’s Energy Program for Security and Independence*. Retirado de http://www.navy.mil/secnavem 25/03/2013.

WeatherOnline Ltd (2014). WeatherOnline. *Lisbon – Analysis (year)*. Retirado de http://www.weatheronline.co.uk em 10/07/2014.

Wind & Sun Ltd (2013). Wind & Sun. *SMA Monitoring*. Retirado de http://www.windandsun.co.uk/products/Inverters/SMA-Inverters/SMA-Communication-Displays-and-Monitoring/SMA-Monitoring em 17/09/2014.

Winnes, H. & Fridell, E. (2010). Emissions of NOx and particles from manoeuvring ships. *Transportation Research Part D*, 15, 204-211.

Yoshida, K. (2011). *Energy Efficiency Design Index (EEDI) MARPOL ANNEX IV and Marine Environment protection*. IMO MEPC Air pollution prevention and energy efficiency working group And ISO TC8/SC2.

A. Dados do vento no local de estudo

Abril 2013
Horas vento >= 3 m/s
Velocidade do vento
Horas vento / Velocidade média do vento (m/s)
Dias

Maio 2013
Horas vento >= 3 m/s
Velocidade do vento
Horas vento / Velocidade média do vento (m/s)
Dias

Junho 2013
Horas vento >= 3 m/s
Velocidade do vento
Horas vento / Velocidade média do vento (m/s)
Dias

Julho 2013
Horas vento >= 3 m/s
Velocidade do vento
Horas vento / Velocidade média do vento (m/s)
24
20
16
12
8
4
0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
Dias

Agosto 2013
Horas vento >= 3 m/s
Velocidade do vento
Horas vento / Velocidade média do vento (m/s)
24
20
16
12
8
4
0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
Dias

Setembro 2013
Horas vento >= 3 m/s
Velocidade do vento
Horas vento / Velocidade média do vento (m/s)
24
20
16
12
8
4
0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
Dias

Outubro 2013

Novembro 2013

Figura A.1 – Gráficos mensais de 2013: horas de vento diário acima dos 3 m/s e respectiva velocidade média.

B. Dados introduzidos no *HOMER*

a) Equipamentos a considerar

- Carga
  - Introduzir perfil diário de consumo de energia eléctrica = 39.4 kW (pico) durante 6 horas (das 07h00 às 10h00 e das 17h00 às 20h00)
  - Média diária = 236.400 kWh/dia
  - Tipo de carga = AC
- Módulos FV
  - Dimensão do módulo FV considerado = 255 W
  - Custo do módulo FV = 205.13 €
  - Custo de substituição do módulo FV = 205.13 €
  - Custo de operação e manutenção do módulo FV por ano = 0 €
  - Tempo de vida do módulo FV = 25 anos
  - Dimensão FV total = 29.835 kW
  - Inclinação = 15º
  - Azimute = 2º
- Turbinas eólicas
  - Dimensão da turbina eólica considerada = 1 kW
  - Custo de cada turbina eólica = 1255 €
  - Custo de substituição de cada turbina eólica = 1255€
  - Custo de manutenção e operação de cada turbina eólica por ano = 20 €
  - Quantidade de turbinas eólicas = 2
  - Tempo de vida útil da turbina eólica = 20 anos
  - Altura ao solo (neste caso, água do rio) = 18 metros
  - Introdução dos dados da curva de potência
- Baterias
  - Capacidade da bateria = 300 Ah
  - Custo de cada bateria = 151 €
  - Custo de substituição de cada bateria = 151 €
  - Custo de manutenção e operação de cada bateria por ano = 0 €
  - Número de baterias ligadas em série = 33
  - Número de baterias ligadas em paralelo = 0
  - Tempo de vida útil da bateria = 20 anos
- Gerador a *diesel*
  - Dimensão do gerador considerado = 65 kW
  - Tempo de vida útil do gerador = 60 000 horas
  - Carga mínima = 0 %
  - Custo de capital = 0 €/kW
  - Custo de substituição = 0 €/kW

- Custo de operação e manutenção = 1 €/hora
        - Tipo de corrente = AC
        - Combustível = *diesel*
        - Planeamento = optimizado nas horas de funcionamento das aplicações eléctricas, estando desligado fora desse horário.
    - Inversor de energia eléctrica
        - Dimensão do conversor de energia considerado = 32 kW
        - Custo do inversor = 4089.10 €
        - Custo de substituição do inversor = 4089.10 €
        - Custos de operação e manutenção do inversor por ano = 0 €/kW
        - Tempo de vida útil do inversor = 15 anos
        - Eficiência do inversor = 97 %
        - Capacidade relativa do inversor = 0

    Se o valor fosse diferente de zero, seria um conversor de energia nos dois sentidos, isto é DC/AC e AC/DC, o que não se pretende no presente estudo.

b) Recursos energéticos
    - Sol: Introduzido o perfil de radiação solar diária para o local de estudo
    - Vento: Introduzido o perfil de vento para o local de estudo
    - *Diesel*: Preço = 1.384 €/L (Fuel-prices-europe.info, 2014)

c) Dados económicos
    - Taxa de juro real anual = 5 %
    - Vida útil do sistema = 20 anos

d) Restrições
    - Fracção mínima de energia renovável = 30 %
    - Reserva de operação das necessidades energéticas por hora = 10 %
    - Reserva de operação de output de energias renováveis:
        - Solar = 5 %
        - Vento = 5 %

C. Auxiliar da Análise de projecto

Tabela C.1 – Plano de investimentos do projecto

Anos	VAL da exploração (receitas-despesas exploração) (€)	VAL dos investimentos (€)	VAL do *Cash-Flow* total (€)
0	0	0	0.00
1	5694.30	35199.81	-29505.50
2	10846.29	33523.63	-22677.33
3	15494.71	31927.26	-16432.56
4	19675.82	30406.92	-10731.10
5	23423.59	28958.97	-5535.38
6	26769.82	27579.97	-810.15
7	29744.25	26266.64	3477.61
8	32374.69	25015.85	7358.84
9	34687.17	23824.62	10862.55
10	36706.00	22690.11	14015.89
11	38453.90	21609.63	16844.27
12	39952.10	20580.60	19371.51
13	41220.43	19600.57	21619.85
14	42277.36	18667.21	23610.15
15	43140.16	20213.73	22926.43
16	43824.93	19251.17	24573.75
17	44346.65	18334.45	26012.20
18	44719.31	17461.38	27257.93
19	44955.92	16629.89	28326.04
20	45068.60	15837.99	29230.61

D. Planta do espaço da casa das máquinas
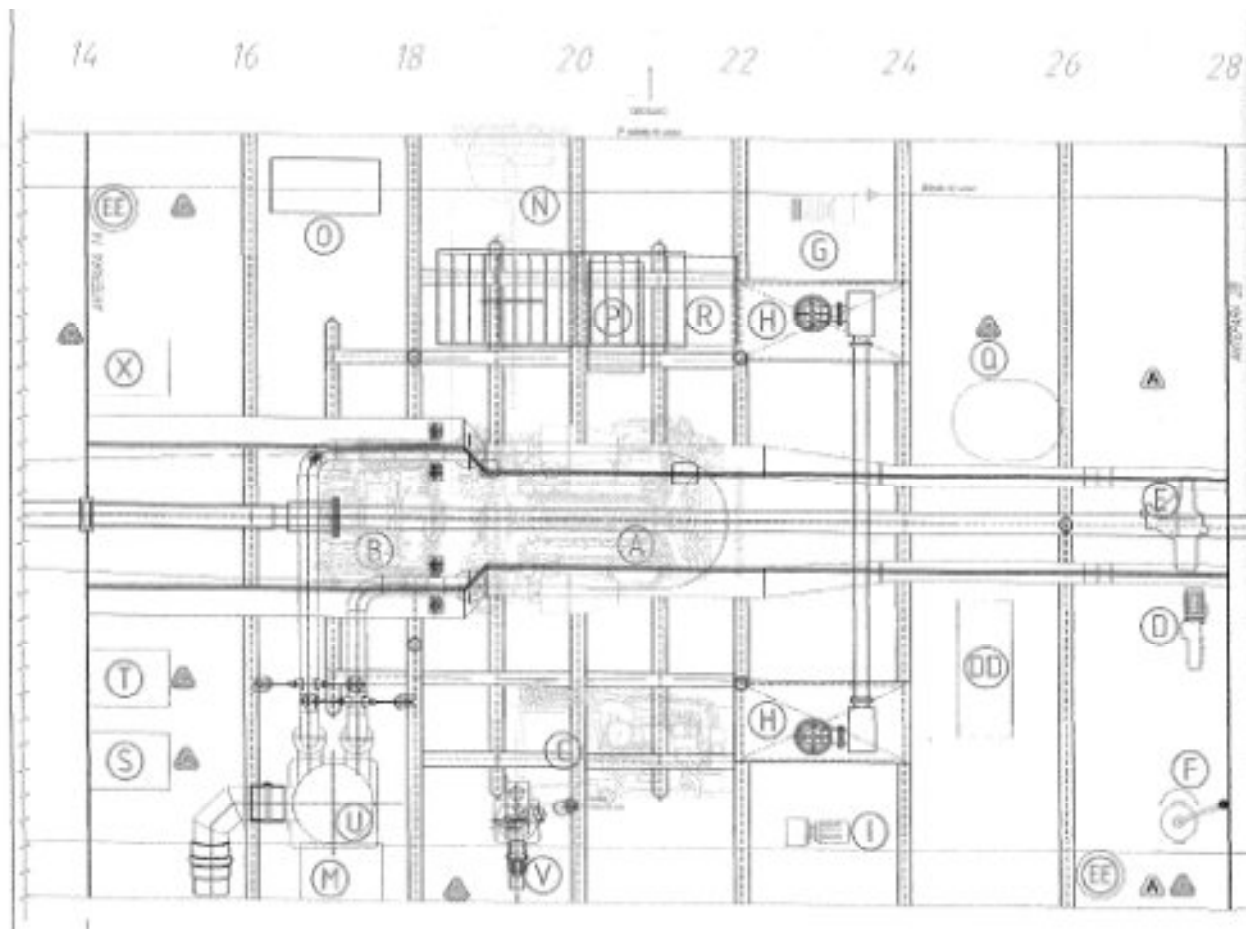
Figura D.1 – Planta do espaço da casa das máquinas do “LISBONENSE”.